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

Обоснование параметров использования немодифицированных отходов железо-магниевого производства в качестве природоподобного мелиоранта для иммобилизации кадмия

Н.Ю.Антонинова✉, А.В.Собенин, А.И.Усманов, Я.А.Кузнецова
Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Кузнецова Я.А. Обоснование параметров использования немодифицированных отходов железо-магниевого производства в качестве природоподобного мелиоранта для иммобилизации кадмия // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 22-34. EDN NSXNRI

Аннотация
Представлена оценка использования отходов железо-магниевого производства для ремедиации почв, загрязненных кадмием. Отходы содержат, мг/кг: Mg 175000, Fe 52000, K 30000 и следы Cu, Zn, Co без детектируемого Cd. Кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) выращивали семь суток на субстрате с Cd 10 мг/л и тремя дозами железо-магниевого композиционного состава (ЖМКС) 10, 60 и 120 г/м^2. Для сравнения использовали $FeSO_4$, $MgSO_4$ и их комбинацию. Оценивали всхожесть, длину корней, pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), минерализацию, влажность, содержание металлов в почве и растениях (методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии); рассчитывали коэффициенты корневого барьера (ККБ) и накопления (КН). Высокая доза ЖМКС (Т4, 120 г/м^2) максимально иммобилизовала Cd (снижение подвижной формы на 38 % до 9,6 мг/кг), устранила дефицит Mg и стимулировала рост корней на 30,6 %, но вызвала засоление (TDS до 740 мг/л) и накопление Ni до 39,8 мг/кг и Co до 5,2 мг/кг в почве. Низкая доза (Т6, 10 г/м^2) снизила доступность Cd до 11 мг/кг и увеличила рост корней на 10,4 % без значимого засоления (TDS 270 мг/л). Ni и Co эффективно удерживались корнями (ККБ для Ni 1,96, Co > 3,0), их транспорт в побеги минимален (КН для Ni 1,26, Co 0,60). Для краткосрочного эффекта обоснована доза 120 г/м^2 с контролем засоления. Оптимальное долгосрочное решение – доза 10 г/м^2.

Ключевые слова
ремедиация почв; кадмий; железо-магниевые отходы; отходы производств; мелиоранты; биотестирование; природоподобные материалы; коэффициент корневого барьера; коэффициент накопления; вторичное загрязнение

Финансирование
Статья подготовлена в рамках Государственного задания 075-00408-26-00 № 125070908250-1, тема 2 «Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр» (FUWE-2025-0002).

Поступила: 09.04.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 30.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Загрязнение почв тяжелыми металлами, в частности кадмием (Cd), представляет собой одну из наиболее важных задач при разработке мероприятий по охране окружающей среды [1, 2]. Кадмий отличается высокой мобильностью в природных средах [3, 4], токсичностью [5], способностью к биоаккумуляции и включению в пищевые цепи [6], что создает серьезные риски для здоровья человека и устойчивости экосистем [7]. Основными источниками поступления кадмия в окружающую среду являются предприятия горно-металлургического комплекса [8, 9], сельского хозяйства, в том числе и при использовании фосфорных удобрений [10, 11].

Самым распространенным мероприятием по снижению биодоступности тяжелых металлов является применение химических мелиорантов, таких как известняковая (известковая) мука и фосфориты, способных иммобилизовать токсичные элементы [11]. Однако эффективность этих методов неоднозначна и сильно зависит от конкретных почвенных условий. Исследования показывают,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

что в почвах, систематически удобряемых жидкими навозными стоками, известкование, хотя и повышает pH, одновременно увеличивает и подвижность кадмия. Этот эффект объясняется образованием устойчивых и мобильных фульватных комплексов Cd при подщелачивании органически загрязненной среды [11]. Альтернативный мелиорант – фосфоритная мука, содержащая глауконит, показывает более стабильный, хотя и слабый иммобилизующий эффект, однако его сорбционная способность резко снижается в отношении органоминеральных форм металла [11]. Противоречивость действия традиционных подходов к решению вышеуказанных задач подтверждается и другими работами [12]. В торфяных почвах использование гашеной извести, особенно в сочетании с минеральными удобрениями (NPK), приводило к наибольшему накоплению кадмия в растениях, а при внесении в грунт природного цеолита фиксировалось снижение биодоступности для растений [12]. Полученные данные свидетельствуют о том, что эффективность традиционных мелиорантов сильно зависит от конкретных почвенных условий и их применение не всегда гарантирует результат. В связи с этим актуальным является поиск новых, более универсальных и экологически безопасных материалов для иммобилизации кадмия, способных обеспечить стабильный эффект без подбора сложных граничных условий. Перспективным направлением представляется использование техногенных отходов, в частности железо-магниевых производств, которые могут выступать в качестве природоподобных мелиорантов.

На современном этапе исследований в области мелиорации загрязненных земель направления смещаются в сторону разработки высокоэффективных композиционных и модифицированных материалов. Перспективными направлениями являются природные и модифицированные сорбенты. Композиционные материалы на основе природных минералов (например, аттапульгита) и отходов (раковин устриц) показывают синергетический эффект, сочетая высокую адсорбционную емкость (до 197 мг/г для Cd) со способностью регулировать кислотность почвы, что дополнительно снижает подвижность металлов [13]. Другим направлением являются функционализированные биоугли. Химическая модификация биоугля, например перманганатом калия, значительно увеличивает возможности применения его в качестве мелиоранта-иммобилизатора. Такие материалы способны снижать доступность Cd в почве на 43 % и его накопление в сельскохозяйственных культурах на 66 % [14]. Инновационные разработки, такие как гидрогель на основе биоугля, обогащенный фосфатмобилизующими бактериями, совмещают адсорбцию кадмия до 98 % с поставкой растениям необходимого фосфорного питания, повышая плодородие почвы [15].

Общий тренд – создание «природоподобных» технологий, которые обеспечивают комплексную экологическую реабилитацию за счет синергии нескольких механизмов (сорбция, осаждение, изменение pH) и одновременно решают задачу утилизации вторичного сырья. Особенно перспективным в данном направлении представляется использование отходов горно-добывающей промышленности, например отходов железо-магниевого производства [16, 17], в составе которых присутствуют соединения, способные к сорбции тяжелых металлов и изменению кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных свойств почвы. Подобный подход позволяет использовать отходы в качестве материалов для снижения подвижности и биодоступности кадмия в загрязненных почвах, что соответствует принципам переработки отходов и ресурсосбережения.

Таким образом, цель настоящей работы – обоснование параметров (оптимальные дозы, условия применения) использования немодифицированных отходов железо-магниевого производства в качестве узконаправленного природоподобного мелиоранта для иммобилизации кадмия в загрязненных почвах. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- оценить дозозависимое влияние железо-магниевых отходов на физико-химические параметры грунтов (pH, окислительно-восстановительный потенциал, общая минерализация, влажность);
- исследовать влияние мелиоранта на биологическую доступность кадмия для тест-культуры, оценив его аккумуляцию в корнях и побегах;
- провести комплексную оценку сопутствующего воздействия мелиоранта на миграцию других химических элементов (Ni, Co, Cu, Zn, Fe, Mn, Mg, K) для исключения риска вторичного загрязнения;

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• на основании анализа определить безопасные и эффективные диапазоны доз внесения отходов для задач иммобилизации кадмия.

Материалы и методы

Объекты исследования. *Субстрат*. В качестве объекта исследования использовалась почва, отобранная на территории экспериментально-исследовательской базы Института горного дела УрО РАН (с. Фомино, Сысертский район, Свердловская обл.). Участок характеризуется антропогенной нагрузкой, так как ранее на территории выращивались различные сельскохозяйственные культуры, велись строительные работы, а также территория расположена примерно в 15 м от автомобильной дороги. Почва относится к серым лесным с тяжелым гранулометрическим составом, имеет зернисто-ореховатую структуру, реакция среды близка к нейтральной. С целью моделирования субстратов, характерных для интенсивного овощеводства, почва была смешана с торфяным грунтом в соотношении 7:3. В интенсивном овощеводстве широко используются многокомпонентные субстраты, включающие торф, которые нередко загрязнены кадмием вследствие применения минеральных удобрений. Схожие по составу субстраты ранее были нами апробированы в опытах по поиску мелиорантов, иммобилизующих кадмий [18].

Тест-культура. В качестве тест-объекта использовали кресс-салат (*Lepidium sativum* L.). Культура выбрана в связи с коротким вегетационным периодом, чувствительностью к загрязнению тяжелыми металлами.

Мелиоранты. Исходными отходами являются хвосты обогащения хризотил-асбеста, относящиеся к серпентинитам. Из этих отходов получают соединения магния, после чего также образуются вторичные пастообразные отходы 3-го класса опасности [15, 16]. Значения ПДК/ОДК (предельно и ориентировочно допустимых концентраций) в табл.1 даны по СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». В странах СНГ общий объем накопленных серпентинитовых отходов составляет более 500 млн т [19]. Их элементный состав характеризуется высоким содержанием магния 175000 мг/кг, железа 52000 мг/кг и калия 30000 мг/кг, а также наличием следовых количеств меди, цинка и кобальта, требующих контроля. Содержание кадмия в отходах находится ниже предела обнаружения, что минимизирует риск прямого загрязнения.

Таблица 1

Элементный состав материалов (валовое содержание), мг/кг

Cu	Mg	Fe	Zn	Cd	Co	Ni	Mn	K
Немодифицированные отходы железо-магниевого производства								
41,3±1,1	175000 ± 3500	52000±2000	77,7±1,8	< 0,037	119,8±1,4	3083±48	1010±35	30140±787
Субстрат								
7,10±0,87	1610±40	10600±250	42,3±1,8	0,68±0,20	4,20±0,65	22,30±1,1	190,50±3,5	4370±90
ПДК/ОДК								
–/132	–	–	–/220	–/2	–	–/80	1500/–	–

Перед использованием железо-магниевый композиционный состав (ЖМКС) был высушен при температуре 105 °С и просеян через сито с диаметром отверстий 1 мм. Для сравнительного анализа использовали сульфат железа $FeSO_4$ (Т3), сульфат магния $MgSO_4$ (Т2) и их комбинацию (Т1) как традиционные материалы, широко применяемые в сельском хозяйстве. Доза сульфатов ~14 г/м^2 соответствует средней агрономической норме внесения для большинства культур.

Моделирование кадмиевого загрязнения. Загрязнение почвы кадмием моделировали внесением раствора, приготовленного из государственного стандартного образца (ГСО 7874-2000). Раствор с концентрацией Cd 10 мг/л вносили в количестве 10 мл на 60 г воздушно-сухой почвы. После внесения раствора почву оставляли на две недели для достижения сорбционного равновесия. Концентрация содержания подвижных форм кадмия в почве, полученных после обработки, – 15,4±3,9 мг/кг.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Методика эксперимента. Эксперимент проводили в чашках Петри диаметром 100 мм (площадь 0,00785 м^2). Дозы мелиорантов пересчитывали на площадь чашки: 10 г/м^2 ЖМКС – 0,08 г на чашку (Т6); 60 г/м^2 – 0,5 г (Т5); 120 г/м^2 – 0,9 г (Т4); сульфаты (Т1-Т3): 14 г/м^2 – 0,1 г на чашку. Навеску мелиоранта тщательно перемешивали с 60 г загрязненной почвы до достижения однородной смеси. Полученный субстрат помещали в чашки Петри, увлажняли дистиллированной водой и оставляли на двое суток для стабилизации. Семена кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) высевали поверхностно (без заглубления), что соответствует агротехнике данной культуры. Эксперимент проводили в трехкратной повторности. Продолжительность вегетации составила семь суток в соответствии с рекомендациями производителя семян (период созревания кресс-салата 8±2 дня). За это время формируется полноценная взрослая особь, пригодная для оценки накопления и перераспределения металлов в системе корни – побеги. По окончании рассчитывали относительные показатели всхожести семян (RGP) и длины корней (RRG) с последующей их оценкой [12, 13].

Подготовка проб. Растительные образцы озоляли по ГОСТ 26929-94 в комплексе для пробоподготовки ТЕМОС-ЭКСПРЕСС (ООО «ИТМ», Россия) со ступенчатым повышением температуры от 250 до 450 °С. Полученную золу обрабатывали азотной кислотой, выпаривали и прокаливали при 300 °С, повторяя цикл до получения золы. На завершающем этапе золу смачивали азотной кислотой и количественно переносили раствор в пробирку.

Определение валовых форм металлов в почве. Пробоподготовку выполняли в микроволновой системе MARS 5 (CEM Corporation, США) по методике EPA 3052. К навеске 0,5 г приливали 9 мл HNO_3 и 3 мл HF, выдерживали 15 мин, затем нагревали до 180 °С в течение 6 мин и выдерживали 10 мин при мощности 1800 Вт в герметичных сосудах EasyPrep. После охлаждения объем доводили до 50 мл, получая прозрачный раствор.

Определение подвижных форм металлов в почве. Подвижные кислоторастворимые формы металлов определяли экстракцией образцов почвы одномерным раствором азотной кислоты в соотношении массы к объему 1:10. Для этого 5 г почвы помещали в 50 мл одномерного раствора азотной кислоты и перемешивали на ротаторе.

Аналитические методы. Концентрации металлов (Cu, Zn, Cd, Co, Mg, Fe, Ni, K) в растениях и почве определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии в воздушно-ацетиленовом пламени (Varian AA 240 fs, Varian Australia Pty Ltd.) [12, 13, 17]. В почвенных субстратах измеряли ключевые физико-химические параметры: pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), общую минерализацию (TDS) и влажность.

Оценка транслокации металлов. Для анализа перераспределения элементов в системе почва – корни – побеги рассчитывали два основных коэффициента [12, 13]:

- коэффициент корневого барьера (ККБ), показывающий способность корней задерживать элемент (ККБ > 1);
- коэффициент накопления (КН), отражающий степень аккумуляции элемента надземной частью растения из почвы (КН > 1).

С использованием дисперсионного анализа и критерия Тьюки между вариантами опыта оценивали статистическую значимость различий при $p < 0,05$.

Расчет допустимой дозы внесения ЖМКС проводили по методике С.Е.Витковской:

$$ДД = (0,8\ ПДК_п – С_{фон})М_п / (С – С_{фон})T,$$

где $ПДК_п$ – норматив СанПиН 1.2.3685-21; $С_{фон}$ – содержание элемента в почве до внесения; $М_п$ – масса пахотного слоя, $М_п$ = 3000 т/га; С – содержание элемента в мелиоранте; T – срок внесения, T = 1. Лимитирующей считали наименьшую расчетную дозу.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ современных методов очистки почв от кадмия выявил, что большинство существующих подходов хоть и решают задачу иммобилизации металла, но не предусматривают комплексный учет экологических факторов. Это может приводить к вторичному загрязнению. Кроме того, многие эффективные мелиоранты требуют сложной модификации или являются дорогостоящими. В связи с этим актуален поиск доступных природоподобных материалов, способных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

иммобилизовать кадмий, даже если они имеют собственные ограничения (например, привнос сопутствующих элементов) при условии контроля этих рисков. Применение отходов железо-магниевого производства в качестве природоподобного мелиоранта представляется целесообразным для дальнейшего изучения с обязательной оценкой побочных эффектов.

Соединения железа и магния являются естественными ключевыми компонентами почвенных минералов [20-22]. Содержащиеся в подобных отходах гидроксиды и оксиды железа, благодаря развитой удельной поверхности, выступают одними из наиболее эффективных природных сорбентов тяжелых металлов [23, 24]. Однако для исключения риска вторичного загрязнения необходима комплексная оценка воздействия сорбента. Важно проанализировать как биологический отклик экосистемы, так и изменения в почвенной среде. Показатели роста, развития кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и физико-химические свойства грунта при внесении различных материалов представлены в табл.2. Комплексный анализ всех показателей позволяет детально сопоставить влияние различных мелиорантов на систему растение – почва в условиях кадмиевого стресса [25, 26]. По ключевому параметру начального развития – RGP – все варианты обработки продемонстрировали 100 %-ную эффективность. Последующее же развитие проростков, оцениваемое по параметру RRG, выявило существенные различия. Максимальная стимуляция корнеобразования, превышающая уровень чистого контроля на 30,6 %, была достигнута при внесении дозы 120 г/м^2 (T4) железо-магниевого отхода. Комбинированное применение сульфатов железа и магния (T1) также показало значимый положительный результат, увеличив длину корней на 14,7 %, в то время как раздельное их внесение (T2, T3) и доза отхода 10 г/м^2 (T6) обеспечивали умеренный, но стабильный прирост. Неожиданно низкая эффективность дозы отхода 60 г/м^2 (T5), сравнимая лишь с угнетенным кадмиевым контролем, указывает на наличие узкого диапазона дозировок, где негативные факторы, вероятно связанные с осмотическим стрессом, перевешивают защитный эффект.

Таблица 2

Развитие кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и физико-химические свойства грунта

Параметр	RGP, %	RRG, %	pH	ОВП, мВ	TDS, мг/л	*W*, %
K	100,0±0,0*a*	100,0±0,0*d*	5,90±0,10*bc*	191±3*b*	279±5*a*	7,98±0,14*a*
KCd	83,3±1,4*b*	91,7±1,6*a*	5,86±0,10*bc*	213±4*a*	283±5*a*	7,92±0,14*a*
T1	100,0±0,0*a*	114,7±1,12*b*	5,48±0,09*a*	187±3*b*	302±5*a*	7,96±0,14*a*
T2	100,0±0,0*a*	109,2±0,2*c*	5,58±0,09*ac*	169±3*c*	302±5*a*	7,99±0,14*a*
T3	100,0±0,0*a*	109,6±0,8*c*	5,84±0,10*bc*	205±3*d*	326±6*b*	7,89±0,14*a*
T4	100,0±0,0*a*	130,6±0,5*e*	6,80±0,12*e*	128±2*f*	740±13*e*	9,05±0,16*b*
T5	100,0±0,0*a*	108,9±3,2*c*	6,29±0,11*d*	187±3*b*	550±10*d*	8,98±0,16*b*
T6	100,0±0,0*a*	110,4±0,7*c*	5,97±0,22*c*	204±4*d*	270±5*a*	8,28±0,15*a*

Примечание. Разные латинские буквы обозначают статистически значимые различия при $p < 0,05$ между группами; одинаковые буквы – отсутствие статистически значимых различий; K – чистый торфяной грунт; KCd – торф, загрязненный кадмием.

Воздействие на физико-химические свойства грунта различалось в зависимости от природы мелиоранта. Сульфаты (T1-T3) вызывали слабое подкисление почвенного раствора со смещением pH от 5,48 до 5,84. В противоположность этому техногенный отход ЖМКС действовал как активный щелочной агент, причем его эффект был строго дозозависимым – от незначительного сдвига при малой дозе (T6, pH 5,97) и подщелачивания (T4, pH 6,80). Такое изменение pH само по себе является мощным фактором иммобилизации ионов кадмия. Не менее выраженно влияние на окислительно-восстановительные условия. В то время как кадмиевое загрязнение само повышало ОВП (KCd 213 мВ), различные мелиоранты модулировали этот параметр разнонаправленно – сульфат магния (T2, 169 мВ) существенно понижал, а сульфат железа (T3, 205 мВ) и низкая доза отхода (T6, 204 мВ) повышали. Максимальное снижение ОВП, свидетельствующее о создании восстановительной среды, было зафиксировано при внесении высокой дозы отхода (T4, 128 мВ).

Сульфаты и низкая доза отхода не привели к статистически значимому засолению почвы, оставив показатель на уровне контрольных вариантов (270-302 мг/л). Дозировки 60 г/м^2 (T5) и 120 г/м^2 (T4) техногенного отхода вызвали дозозависимый рост минерализации относительно

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

контрольных образцов в 2 и 2,7 раза соответственно, чем создали прямой риск осмотического стресса для более чувствительных растительных культур. Значимое увеличение влажности почвы *W* наблюдалось лишь при внесении средних (Т5, 8,98 %) и высоких доз отхода (Т4, 9,05 %), что может быть связано с его гигроскопичными свойствами.

Таким образом, сравнение выявляет два альтернативных направления. Первое, представленное комбинацией сульфатов (Т1), обеспечивает эффективную защиту растений и стимуляцию их корневой системы без индуцирования негативных изменений в почвенном комплексе. Второе, связанное с использованием техногенного отхода, демонстрирует высокую эффективность в преодолении кадмиевого стресса и стимуляции роста. Однако эта эффективность достигается трансформацией почвенной среды, включающей ее подщелачивание, засоление и изменение окислительно-восстановительного статуса.

На основе данных корреляционной матрицы, представленной на рис.1, можно сделать следующие выводы о взаимосвязях между изучаемыми параметрами. Наиболее значимая связь наблюдается между показателями, характеризующими физико-химические свойства грунта. Значение коэффициента корреляции Пирсона *r* между общей минерализацией и влажностью почвы составляет 0,91, что свидетельствует о почти функциональной прямой зависимости. Столь же сильная прямая связь зафиксирована между кислотностью почвы и минерализацией (r = 0,89), а также между кислотностью и влажностью (r = 0,88). Рост общей минерализации обусловлен внесением растворимых компонентов отхода и сульфатов, которые одновременно увеличивают осмотическое давление и способствуют удержанию влаги в почвенном растворе [27], что и приводит к прямой корреляции TDS и *W*. Связь pH с TDS возникает по причине того, что щелочные компоненты ЖМКС при растворении увеличивают pH [28]. Соответственно, рост pH сопровождается повышением минерализации, что и отражает коэффициент r = 0,89.

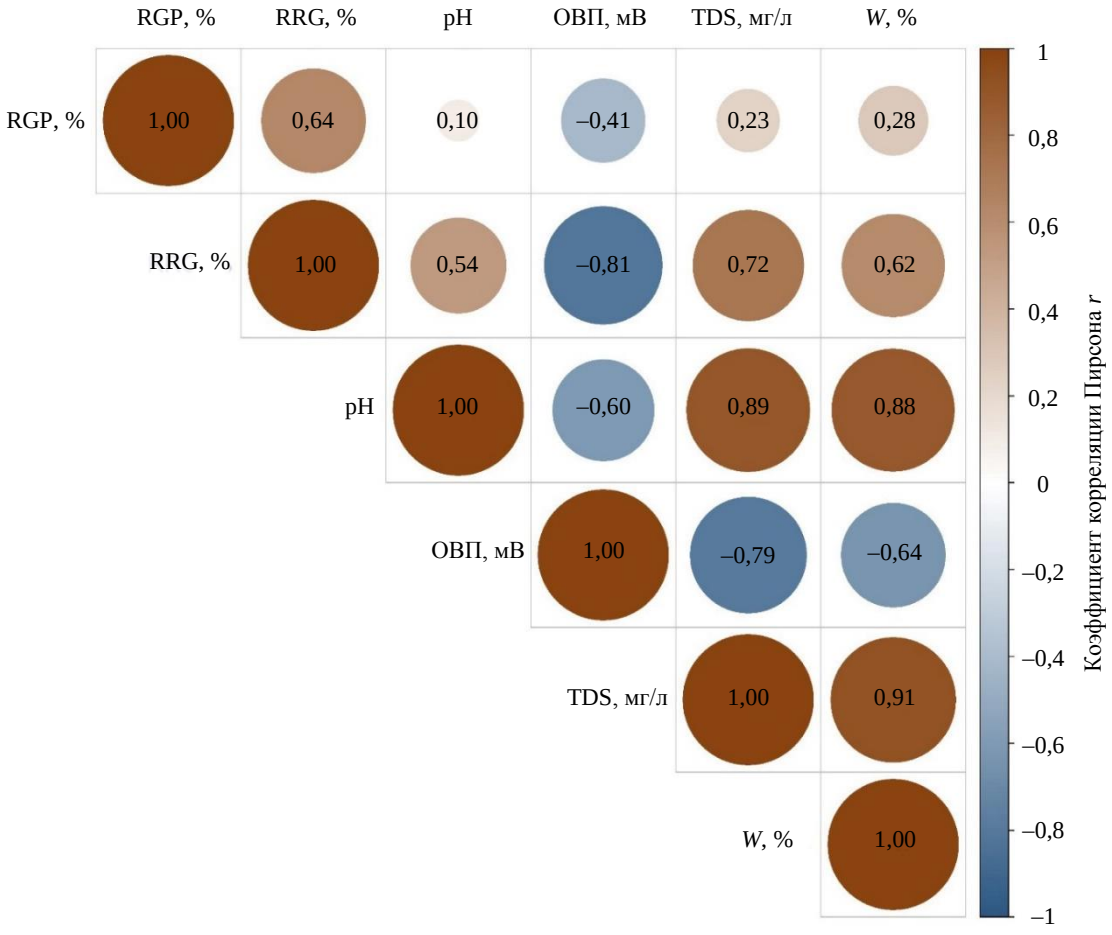


Рис.1. Корреляционная матрица параметров роста и развития кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) с показателями грунта при внесении различных материалов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Ключевой показатель развития растения – относительная длина корней – показывает сильную положительную корреляцию с уровнем засоления (r = 0,72) и влажностью почвы (r = 0,62), а также умеренную связь с ее кислотностью (r = 0,54). Однако наиболее выраженной является сильная отрицательная корреляция длины корней с ОВП, значение коэффициента для которой составляет –0,81. Это указывает на то, что улучшение роста корневой системы статистически связано со смещением окислительно-восстановительных условий в сторону более восстановительных. Окислительно-восстановительный потенциал, в свою очередь, имеет обратную связь с TDS (r = –0,79) и с pH (r = –0,60), а именно подщелачивание и засоление почвы, индуцированное мелиорантом, способствует снижению ОВП, что коррелирует с развитием корней в стрессовых условиях.

Таким образом, корреляционный анализ статистически подтверждает, что влияние обработок, особенно техногенным отходом (Т4-Т6), на характеристики кресс-салата осуществляется не изолированно, а в рамках трансформации почвенной среды. Эта трансформация выражается в повышении pH, росте общего солесодержания, увеличении влажности и снижении ОВП.

Основным фактором, определяющим эффективность мелиорантов, является поведение кадмия в системе грунт – корни – побеги [29, 30]. Элементный состав грунта и особей кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) при внесении различных материалов (Т1-Т6) представлен в табл.3. Значения ПДК даны по Техническому регламенту Таможенного союза 021/2011 «О безопасности пищевой продукции (с изменениями на 22 апреля 2024 года)». В то время как во всех обработанных вариантах его общее содержание в почве оставалось высоким (14,2-15,4 мг/кг в контроле Cd и вариантах Т1-Т3), внесение отходов железо-магниевого производства (ЖМКС) статистически значимо снизило его концентрацию в грунте до 9,6, 11,2 и 11 мг/кг для вариантов Т4-Т6 соответственно (рис.2). Напротив, внесение сульфатов железа и магния (Т1-Т3) не привело к статистически значимому снижению содержания кадмия в почве, что указывает на иной механизм их защитного действия [30]. В вариантах с сульфатами магния и железа (Т1-Т3) корни кресс-салата аккумулировали максимальные количества кадмия – 19,8, 21,8 и 22,1 мг/кг соответственно, что существенно выше, чем в контроле Cd 0,97 мг/кг. Транслокация кадмия в побеги при этих обработках была значительно ниже – 17,8, 11,4 и 22,7 мг/кг для вариантов Т1-Т3 соответственно против 38,8 мг/кг (КCd). В варианте с высокой дозой ЖМКС (Т4) наблюдалась другая картина – содержание кадмия в корнях составило 11,9 мг/кг, что в 1,6-1,9 раза ниже, чем при обработке сульфатами, а в побегах – всего 9,2 мг/кг. Это подтверждает стратегию, при которой иммобилизация кадмия в почве ограничивает его поступление в растение в целом [31-33].

Параллельно с динамикой кадмия материалы оказывали влияние на обеспеченность растений другими элементами (табл.3). Кадмиевый стресс в контроле КCd вызывал дефицит магния и железа в корнях – содержание Mg падало с 5333 до 1069 мг/кг, а Fe – с 7145 до 2158 мг/кг. Наиболее эффективно устранялся дефицит магния в варианте Т4, где его содержание в корнях возросло до 10263 мг/кг, что в 9,6 раза превышает уровень в КCd, а в почве – до 4801 мг/кг (в 6,5 раза выше контроля КCd). Сульфаты также повышали содержание магния и железа в корнях по сравнению с КCd, но их эффект был менее выраженным.

Однако применение техногенного отхода ЖМКС, особенно в высоких дозах, привело к загрязнению почвы сопутствующими токсичными элементами. Так, содержание никеля в грунте варианта Т4 составило 39,8 мг/кг, что в 3,9 раза выше, чем в контроле КCd 10,3 мг/кг, а кобальта – 5,22 мг/кг против 1,22 мг/кг в чистом контроле. Эти элементы также активно поглощались корневой системой, концентрация никеля в корнях достигла 97,9 мг/кг, кобальта – 9,60 мг/кг. Однако их транспорт в побеги был существенно ниже – для никеля содержание в побегах – 49,9 мг/кг, для кобальта – 3,15 мг/кг.

Концентрация марганца в корнях резко падала с 382,6 мг/кг в чистом контроле до 62,4 мг/кг при загрязнении. Все мелиоранты в разной степени восстанавливали уровень марганца, достигая, например, 281,0 мг/кг при внесении высокой дозы ЖМКС (Т4). Сульфат железа (Т3) также способствовал значительному накоплению меди (22,5 мг/кг в корнях) и цинка (45,3 мг/кг в корнях и 85,2 мг/кг в побегах) в тканях растения. Содержание калия в побегах под действием кадмия возрастало на 45 % (110614-160605 мг/кг), тогда как в корнях оно сокращалось вдвое (48257-23436 мг/кг). Все изученные обработки, кроме сульфата железа (Т3, 234369 мг/кг в побегах), нормализовали высокий уровень калия в побегах, снижая его до значений около 100000-130000 мг/кг.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Элементный состав субстратов и особей кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), мг/кг

Параметр	Cu	Zn	Cd	Co	Mg	Mn	K	Ni	Fe
					Субстрат				
К	3,08±0,57*a*	11,3±1,6*ab*	0,37±0,15*b*	1,22±0,25*bc*	748±83*a*	111,6±15,2*a*	1975±153*ab*	10,3±1,8*a*	4664±536*a*
КCd	2,87±0,51*a*	10,8±1,3*a*	15,4±3,9*a*	1,48±0,58*abc*	738±177*a*	105,8±25,3*a*	1945±180*ab*	11,5±3,5*a*	4907±1215*a*
Т1	6,31±0,40*b*	11,2±1,3*ab*	14,5±1,2*a*	1,56±0,19*abc*	930±355*ab*	108,2±26,1*a*	1669±163*cd*	19,5±5,0*b*	4915±1354*a*
Т2	4,48±1,12*c*	11,1±1,4*ab*	14,9±1,9*a*	1,08±0,14*b*	1174±366*b*	108,9±25,1*a*	1797±150*ac*	11,1±3,2*a*	5015±1834*a*
Т3	2,72±0,80*a*	11,4±1,2*ab*	14,2±1,2*a*	2,06±0,40*a*	756±245*a*	107,9±33,0*a*	2146±225*b*	28,0±7,5*c*	4895±1536*a*
Т4	4,97±1,41*c*	13,5±1,8*b*	9,6±1,2*c*	5,22±2,10*d*	4801±1120*c*	179,2±45,1*b*	1563±163*d*	39,8±10,7*d*	7291±2634*b*
Т5	3,77±0,66*ac*	11,9±1,8*ab*	11,2±1,4*c*	3,34±1,02*e*	2387±650*d*	150,7±25,4*c*	2085±190*b*	33,2±9,7*e*	5857±2105*c*
Т6	2,59±0,41*a*	10,8±1,2*a*	11,0±1,7*c*	1,81±0,44*ac*	1764±435*e*	114,0±20,2*a*	1735±150*cd*	25,2±12,0*f*	4558±1865*a*
ПДК/ОДК	3/–	23/–	–	5/–	–	500/–	–	4/–	–
					Корни				
К	13,5±1,0*bc*	32,3±2,0*a*	0,81±0,05*a*	2,96±0,21*bc*	5333±484*d*	382,6±37,6*e*	48257±4457*b*	183,9±15,1*f*	7145±795*d*
КCd	16,3±1,0*a*	32,5±1,8*a*	0,97±0,07*a*	< 0,41	1069±87*a*	62,4±5,7*a*	23436±2336*a*	9,33±0,78*a*	2158±178*a*
Т1	15,9±0,8*ab*	32,7±2,0*a*	19,8±1,4*b*	2,22±0,18*b*	2981±251*bc*	275,2±25,2*bc*	21927±1927*a*	52,3±4,2*b*	4462±362*b*
Т2	12,2±0,7*c*	37,9±2,1*ab*	21,8±1,5*b*	0,85±0,07*a*	4016±402*bcd*	213,9±16,1*b*	47256±3744*b*	20,8±2,1*a*	2562±255*ac*
Т3	22,5±1,1*d*	45,3±2,7*c*	22,1±1,6*b*	4,05±0,32*c*	2706±236*b*	220,9±19,1*bc*	40677±3823*bc*	75,3±6,7*c*	3565±354*bc*
Т4	15,9±0,9*ab*	24,0±1,4*d*	11,9±0,8*c*	9,60±0,77*d*	10263±843*e*	281,0±29,0*c*	20451±2049*a*	97,9±8,8*d*	3725±374*b*
Т5	19,3±1,0*e*	37,2±2,2*ab*	15,8±1,0*d*	9,19±0,69*d*	8270±830*f*	262,5±22,5*bc*	33356±2556*c*	127,2±10,2*e*	3625±365*bc*
Т6	19,3±1,0*e*	40,9±2,0*bc*	14,7±1,1*cd*	< 0,41	4306±430*cd*	132,4±10,6*d*	17700±1770*a*	28,4±2,3*a*	2417±197*a*
					Побеги				
К	8,78±0,45*df*	62,2±3,7*a*	0,73±0,04*g*	< 0,41	4647±372*abd*	112,4±9,0*abc*	110614±8849*bc*	5,78±0,46*b*	935±75*c*
КCd	7,57±0,45*ab*	69,9±3,5*a*	38,8±1,9*a*	< 0,41	4551±364*ab*	123,1±9,8*ab*	160605±12848*a*	150,7±12,1*a*	600±48*a*
Т1	6,67±0,34*ac*	85,2±4,3*b*	17,8±0,9*b*	< 0,41	5946±476*acd*	136,0±10,9*a*	130510±10441*ab*	6,64±0,53*b*	389±31*b*
Т2	6,38±0,32*c*	68,3±3,4*a*	11,4±0,6*cd*	< 0,41	4009±401*b*	91,0±9,1*c*	98542±9854*bc*	6,45±0,52*b*	331±33*b*
Т3	9,34±0,47*de*	85,2±4,3*b*	22,7±1,1*e*	< 0,41	9593±768*e*	165,2±13,2*d*	234369±18749*d*	9,19±0,74*b*	1111±89*c*
Т4	8,26±0,41*bdf*	70,1±3,5*a*	9,2±0,5*c*	3,15±0,19*b*	6367±509*c*	124,2±9,9*ab*	101813±8145*bc*	49,9±4,0*c*	1419±114*d*
Т5	7,78±0,39*abf*	72,3±3,6*a*	12,3±0,6*d*	2,05±0,12*c*	6031±603*cd*	106,7±10,7*bc*	117395±11739*bc*	31,6±2,5*d*	968±97*c*
Т6	10,0±0,5*e*	69,9±3,5*a*	15,1±0,8*f*	< 0,41	6786±543*c*	107,6±8,6*abc*	95812±7665*c*	9,30±0,74*b*	624±50*a*
ПДК	–	–	0,03	–	–	–	–	–	–
					Допустимые дозы внесения				
ЖМКС, т/га	8640	11330	–	70,3	–	3695	–	40,9	–

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

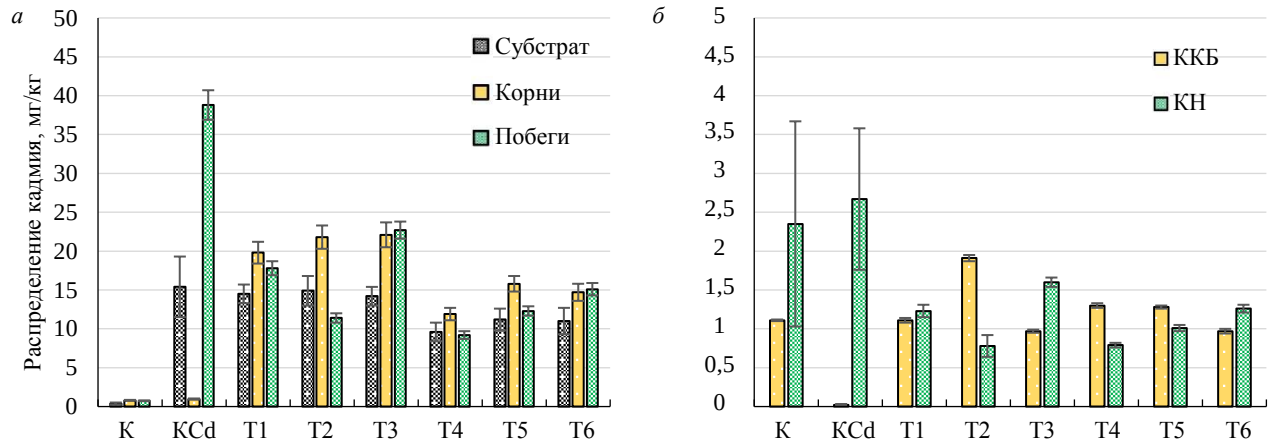


Рис.2. Распределение кадмия в системе субстрат – корни – побеги кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) при разных дозах мелиорантов: *а* – в субстрате, корнях и побегах; *б* – коэффициенты корневых барьера (ККБ) и накопления (КН)

Установлен дефицит железа в корнях, где его содержание снижалось в 3,3 раза (с 7145 до 2158 мг/кг). Этот дефицит эффективно корректировали как сульфатные обработки (например, до 4462 мг/кг при Т1), так и отходы ЖМКС (до 3725 мг/кг при Т4). Отличием действия высокой дозы ЖМКС (Т4) стало подавление накопления цинка в корнях до минимальных 24,0 мг/кг. Таким образом, мелиоранты не просто иммобилизуют кадмий, но и активно перестраивают весь элементный статус растения, корректируя специфические нарушения, вызванные токсикантом [34, 35].

Элементный анализ подтверждает, что зафиксированное улучшение ростовых показателей, особенно в варианте Т4, является результатом сложного перераспределения элементов. Высокая доза ЖМКС реализует стратегию исключения кадмия через его иммобилизацию в почве, одновременно устраняя дефицит магния, но стимулирует накопления в системе других металлов (Ni, Co). Нормативы ПДК по кадмию (табл.3) в побегах кресс-салата не достигнуты, что ожидаемо, так как почва была искусственно загрязнена в повышенных дозах для наглядного наблюдения процесса перераспределения. Сульфаты, в свою очередь, допускают поступление кадмия в корни, но блокируют его транслокацию, смягчая дисбаланс питательных элементов и не вызывая при этом вторичного загрязнения почвы [30, 31].

Расчет ДД внесения ЖМКС, выполненный с использованием нормативов СанПиН 1.2.3685-21 (валовые формы для Cd, Cu, Zn, Ni, Mn и подвижная форма для Co, см. табл.1), показал, что лимитирующим элементом является никель (ПДК 40,9 т/га). Экспериментальные дозы (10-120 г/м^2, что соответствует 0,01-0,12 т/га) ниже расчетной ДД по никелю на два-три порядка и подтверждают безопасность применения мелиоранта в изученном диапазоне доз.

Расчет ККБ и КН для особей кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), выращенных на субстратах, загрязненных Cd, при внесении различных материалов для иммобилизации кадмия (табл.4), позволяет объективно оценить, насколько эффективно корневая система выполняет свою барьерную функцию, задерживая токсичный элемент и предотвращая его поступление в надземную биомассу [36, 37]. Снижение значений ККБ под действием мелиоранта будет прямым свидетельством нарушения этого барьера и усиления транслокации, что указывает на потенциальный экологический риск.

Расчет КН позволил оценить способность растения аккумулировать элемент из почвы [38]. Коэффициент накопления может быть ключевым показателем оценки фиторемедиационного потенциала культуры (если КН > 1) или, наоборот, определения безопасности выращенной продукции (если КН стремится к минимуму).

В контроле (KCd) значение ККБ было низким – 0,023, что демонстрировало полный сбой барьерной функции и массивную транслокацию металла в побеги, где КН достигал 2,67. Все внесенные материалы принципиально меняли эту ситуацию, многократно повышая эффективность удержания кадмия в корнях. Наивысшее значение ККБ для Cd показал сульфат магния (Т2) – 1,91, а наиболее низкое общее поглощение (КН = 0,78) – этот же вариант и высокая доза ЖМКС (Т4) (КН = 0,79). При этом барьерная функция для кадмия в вариантах Т4 и Т5 также была высокой (ККБ = 1,30 и 1,28 соответственно). Это подтверждает стратегию активного удержания кадмия в корнях (Т2) и ограничения его поступления за счет иммобилизации в почве (Т4) [31-33].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Показатели коэффициентов корневого барьера и накопления для особей кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), г/м²

Параметр	Cu	Zn	Cd	Co	Mg	Mn	K	Ni	Fe
				ККБ					
К	1,53±0,03*e*	0,52±0,00*bd*	1,11±0,01*b*	–	1,15±0,02*h*	3,40±0,06*d*	0,43±0,01*b*	31,80±0,1*f*	7,63±0,24*d*
КCd	2,16±0,01*a*	0,46±0,01*ab*	0,023±0,01*a*	–	0,23±0,01*a*	0,50±0,01*a*	0,14±0,01*a*	0,06±0,01*a*	3,59±0,01*ab*
Т1	2,38±0,01*b*	0,38±0,01*ac*	1,11±0,03*b*	–	0,50±0,00*b*	2,02±0,03*b*	0,17±0,00*a*	7,88±0,00*b*	11,5±0,02*c*
Т2	1,92±0,02*c*	0,56±0,06*d*	1,91±0,04*c*	–	1,00±0,00*c*	2,35±0,06*b*	0,48±0,01*b*	3,23±0,06*c*	7,74±0,01*d*
Т3	2,40±0,01*b*	0,53±0,01*bd*	0,97±0,02*d*	–	0,28±0,00*d*	1,35±0,23*c*	0,17±0,03*a*	8,19±0,07*b*	3,24±0,57*ab*
Т4	1,93±0,01*c*	0,34±0,04*c*	1,30±0,03*e*	3,06±0,43*a*	1,61±0,00*e*	2,28±0,42*b*	0,20±0,04*a*	1,96±0,02*d*	2,65±0,47*a*
Т5	2,47±0,00*d*	0,51±0,01*bd*	1,28±0,02*e*	4,48±0,08*b*	1,37±0,00*f*	2,46±0,04*b*	0,28±0,05*c*	4,06±0,7*e*	3,80±0,76*b*
Т6	1,93±0,00*c*	0,59±0,06*d*	0,97±0,03*d*	–	0,63±0,02*g*	1,23±0,00*c*	0,18±0,01*a*	3,05±0,00*c*	3,87±0,01*b*
				КН					
К	2,93±0,66*abe*	5,57±0,53*b*	2,35±1,32*ab*	–	6,23±0,20*c*	1,00±0,03*ab*	56,0±1,1*b*	0,57±0,11*a*	0,20±0,00*e*
КCd	2,67±0,31*ab*	6,58±1,13*ab*	2,67±0,91*a*	–	6,32±1,03*c*	1,16±0,04*b*	82,5±3,5*c*	13,14±0,48*b*	0,12±0,02*d*
Т1	1,06±0,12*c*	7,60±0,18*a*	1,23±0,08*ab*	–	6,39±0,48*c*	1,26±0,11*b*	78,2±6,5*c*	0,34±0,03*a*	0,08±0,01*c*
Т2	1,42±0,04*cd*	6,18±0,51*ab*	0,78±0,14*b*	–	3,42±0,33*a*	0,83±0,05*a*	54,8±5,2*b*	0,58±0,09*a*	0,06±0,01*b*
Т3	3,43±0,07*ae*	7,47±0,24*a*	1,60±0,06*ab*	–	12,69±0,92*d*	1,53±0,06*b*	109,2±9,2*d*	0,33±0,03*a*	0,23±0,02*f*
Т4	1,68±0,22*cd*	5,22±0,56*b*	0,79±0,03*b*	0,60±0,03*a*	1,33±0,11*a*	0,69±0,06*a*	65,1±5,5*b*	1,26±0,11*a*	0,19±0,02*e*
Т5	2,10±0,31*bd*	6,12±0,70*ab*	1,01±0,04*b*	0,61±0,03*a*	2,54±0,36*ab*	0,72±0,13*a*	56,3±5,5*b*	0,95±0,08*a*	0,17±0,02*e*
Т6	3,88±0,51*e*	6,47±0,45*ab*	1,26±0,05*ab*	–	3,85±0,18*ab*	0,94±0,08*ab*	55,2±2,3*b*	0,37±0,03*a*	0,14±0,02*d*

Записки Горного института. *2026. Т. 281. Вып. 2. С. 22-34*
© Н.Ю.Антонинова, А.В.Собенин, А.И.Усманов, Я.А.Кузнецова, 2026

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Кроме того, кадмиевый стресс резко снижал ККБ для магния с 1,15 до 0,23 и марганца с 3,40 до 0,507. Внесение образцов мелиоранта позволило не только восстановить, но в некоторых случаях и усилить этот барьер. Особенно показателен результат для магния в варианте Т4 (ККБ = 1,61). Под действием Cd установлен высокий уровень накопления калия в побегах (КН = 82,5 и 56,0 в чистом контроле). Большинство мелиорантов, в частности Т2 (КН = 54,8) и Т4 (КН = 65,1), эффективно нормализовали этот показатель.

Следствием применения ЖМКС стало появление в системе новых элементов, прежде всего кобальта и никеля. Для кобальта в вариантах Т4 и Т5 были зафиксированы значения ККБ 3,06 и 4,48 соответственно при относительно низком КН 0,6. Это указывает на то, что кобальт, поступающий с отходом, активно поглощается корнями, но его транслокация в побеги ограничивается самой системой. Никель, чей КН в кадмиевом контроле был высок (КН = 13,14), в вариантах с ЖМКС (Т4, Т5) показывал значительно меньшие значения накопления (КН = 1,26 и 0,95), что говорит о меньшей подвижности и доступности его форм, вносимых с отходом, по сравнению с кадмием.

Таким образом, анализ коэффициентов подтверждает, что позитивный эффект мелиорантов заключается не в полной блокаде поглощения, а в перестройке внутреннего распределения элементов – создании эффективного корневого барьера для токсиканта, транспорта важных питательных веществ и, в случае ЖМКС, включении в этот перераспределительный цикл новых микроэлементов с их последующим удержанием преимущественно в подземной биомассе.

Заключение

Проведенное исследование позволило достичь поставленной цели и решить все сформулированные задачи – обосновать использование немодифицированных отходов железо-магниевого производства (ЖМКС) в качестве мелиоранта для иммобилизации кадмия.

Установлено, что внесение ЖМКС оказывает дозозависимое влияние на физико-химические свойства почвы. Высокая доза (120 г/м^2, Т4) вызывает подщелачивание (рост pH до 6,8), увеличение общей минерализации (TDS до 740 мг/л), снижение окислительно-восстановительного потенциала до 128 мВ и повышение влажности, что формирует восстановительную щелочную среду, способствующую иммобилизации кадмия. Низкая доза (10 г/м^2, Т6) не приводит к значимому засолению и изменению pH.

Железо-магниевый композиционный состав является эффективным иммобилизатором кадмия. При внесении высокой дозы зафиксировано снижение подвижных форм Cd в почве до 9,6 мг/кг (против 15,4 мг/кг в контроле Cd), общее накопление в побегах снизилось (КН = 0,79), а корневой барьер возрос (ККБ = 1,30). При этом устранен индуцированный кадмием дефицит магния, что стимулировало рост корней (увеличение длины на 30,6 %).

Основным экологическим риском применения ЖМКС является вторичное загрязнение почвы никелем и кобальтом. В варианте Т4 (120 г/м^2) их содержание в грунте возросло в 3,9 и 4,3 раза соответственно до 39,8 мг/кг Ni и 5,2 мг/кг Co. Однако расчет коэффициентов транслокации показал, что эти элементы активно поглощаются корнями (высокий ККБ 3,06 для Co), но практически не транспортируются в побеги (низкий КН 0,60 для Co и 1,26 для Ni). Риск прямого попадания Ni и Co в пищевую цепь через кресс-салат минимален, однако их долгосрочное накопление в почве требует дальнейшего изучения.

На основании комплексного анализа определены два потенциальных диапазона доз с различным балансом эффективности и безопасности:

- 120 г/м^2 (Т4) – обеспечивает максимальную иммобилизацию Cd и стимуляцию роста корней, но вызывает засоление и накопление Ni, Co в почве. Возможно применение для краткосрочной ремедиации с обязательным последующим мониторингом;
- 10 г/м^2 (Т6) – обеспечивает значимую иммобилизацию Cd, стимуляцию роста корней и формирование корневого барьера, не вызывая статистически значимого засоления или изменения pH. Поступление сопутствующих токсичных элементов (Ni, Co) минимально.

Представленные выводы и рекомендации служат ориентиром для дальнейших исследований и не являются готовым к внедрению регламентом. Дальнейшие исследования предусматривают

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

оценку динамики накопления химических элементов в почве и растениях при выращивании различных культур на разных типах субстратов, а также проведение полевых испытаний в условиях открытого грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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

2. *Ankush, Ritambhara, Lamba S. et al.* Cadmium in Environment – An Overview // Cadmium Toxicity in Water. Springer, 2024. P. 3-20. DOI: 10.1007/978-3-031-54005-9_1

3. *Васильева Т.Н., Галактионова Л.В.* Оценка состояния урбаноземов по содержанию поллютантов // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23. № 12. С. 2-11. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-2-11

4. *Шабанов М.В., Маричев М.С., Бурачевская М.В. и др.* Подвижность, биодоступность, экологические риски кадмия и свинца в почвах Соймоновской долины (г. Карабаш) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 4. С. 104-120. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_104

5. *Genchi G., Sinicropi M.S., Lauria G. et al.* The Effects of Cadmium Toxicity // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17. Iss. 11. № 3782. DOI: 10.3390/ijerph17113782

6. *Zulfiqar U., Ayub A., Hussain S. et al.* Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morpho-physiological Effects and Remediation Strategies // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 212-269. DOI: 10.1007/s42729-021-00645-3

7. *Yonggang Ma, Qunchao Su, Chengguang Yue et al.* The Effect of Oxidative Stress-Induced Autophagy by Cadmium Exposure in Kidney, Liver, and Bone Damage, and Neurotoxicity // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23. Iss. 21. № 13491. DOI: 10.3390/ijms232113491

8. *Мягкая И.Н., Сарыг-оол Б.Ю., Кириченко И.С. и др.* Экогеохимическая оценка рек Ярлы-Амры и Чибитка, расположенных в ореоле действия Акташского ртутного месторождения и его отвалов (Горный Алтай) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 4. С. 7-26. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3273

9. *Yakovlev E., Druzhinina A., Druzhinin S. et al.* Assessment of physical and chemical properties, health risk of trace metals and quality indices of surface waters of the rivers and lakes of the Kola Peninsula (Murmansk Region, North-West Russia) // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44. Iss. 8. P. 2465-2494. DOI: 10.1007/s10653-021-01027-5

10. *Елсукова Е.Ю., Недбаев И.С., Кузьмина Д.С.* Загрязнение почв в зоне воздействия производства фосфорных удобрений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 4. С. 652-674. DOI: 10.21638/spbu07.2022.406

11. *Пилип Л.В., Сырчина Н.В.* Влияние мелиорантов на подвижность кадмия в почвах // Российский журнал прикладной экологии. 2023. № 4. С. 60-66. DOI: 10.24852/2411-7374.2023.4.60.66

12. *Уткин А.А., Аканова Н.И.* Влияние удобрений и мелиорантов на высоту и биомассу горчицы, аккумуляцию растениями кадмия и емкостно-сорбционные свойства торфяной низинной почвы // Плодородие. 2024. № 1 (136). С. 75-78. DOI: 10.25680/S19948603.2024.136.19

13. *Hongyan Zhu, Yangping Wen, Qingyin Shang et al.* Attapulgite/oyster shell composite reduces cadmium and lead bioavailability in acidic agricultural soils through synergistic adsorption and pH regulation // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. № 15609. DOI: 10.1038/s41598-025-00302-0

14. *Liyuan Mu, Hongyin Zhou, Zhengli Lu et al.* Passivation effect of modified biochar on cadmium in mining contaminated soil // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. № 30402. DOI: 10.1038/s41598-025-15860-6

15. *Borgohain A., Baruah M., Gogoi R. et al.* Integrating cadmium removal and phosphate supplementation by fortified biochar hydrogel for agricultural soil: a novel composite material // Discover Agriculture. 2025. Vol. 3. № 273. DOI: 10.1007/s44279-025-00459-2

16. *Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Шепель К.В.* Оценка возможности использования отходов железомагниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов (Cd^{2+}, Zn^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}) // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 257-265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34

17. *Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Горбунов А.А.* Обоснование параметров применения природоподобных материалов на основе отходов горнодобывающей промышленности в качестве мелиорантов // Известия Уральского государственного горного университета. 2025. Вып. 3 (79). С. 99-108. DOI: 10.21440/2307-2091-2025-3-99-108

18. *Sumiao Sun, Xiaojun Wang, Xuejia Gu et al.* Effects of Amendments on Cadmium Adsorption Capacity of Soil and Growth of *Brassica rapa* L. // Heilongjiang Agricultural Sciences. 2024. Vol. 9. P. 25-34 (in Chinese). DOI: 10.11942/j.issn1002-2767.2024.09.0025

19. *Ауешов А.П., Арынов К.Т., Ескибаева Ч.З.* Ресурсная и экономическая эффективность утилизации серпентинита с получением неорганических соединений магния // Academic Scientific Journal of Chemistry. 2025. Т. 3. № 464. С. 29-40 (in English). DOI: 10.32014/2025.2518-1491.298

20. *Беланов И.П., Шипилова А.М., Мезенцева О.П.* Минералогический и гранулометрический составы почв, формирующихся на поверхности железорудных хвостохранилищ // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2024. Т. 67. № 5. С. 542-548. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-5-542-548

21. *Алексеев А.О., Малышев В.В., Алексеева Т.В.* Минералогия и геохимия гранулометрических фракций как инструмент изучения преобразований твердой фазы почв // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2025. Т. 80. № 1. С. 61-70. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-1-61-70

22. *Черноусенко Г.И., Хитров Н.Б., Панкова Е.И.* Магний в засоленных гипссодержащих почвах России // Почвоведение. 2023. № 7. С. 815-830. DOI: 10.31857/S0032180X23600026

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

23. *Линников О.Д., Родина И.В.* Сорбционные свойства свежеосажденного гидроксида железа(III) в отношении ионов никеля. Часть 1. Механизм и эффективность сорбционного процесса // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58. № 6. С. 574-582. DOI: 10.31857/S0044185622060109

24. *Xin Nie, Erping Bi.* Modeling of Cd(II) adsorption on iron (hydr)oxide–organic composites: deviations from additive adsorption in composite sorption systems // Environmental Earth Sciences. 2024. Vol. 83. Iss. 8. № 225. DOI: 10.1007/s12665-024-11561-x

25. *Qian-hui Zhang, Yi-qi Chen, Zhen-bang Li et al.* Defense guard: strategies of plants in the fight against Cadmium stress // Advanced Biotechnology. 2024. Vol. 2. Iss. 4. № 44. DOI: 10.1007/s44307-024-00052-6

26. *Elatafi E., Elhendawy B., Iqbal S. et al.* Physicochemical, Metabolite, Osmolyte Synthesis, and Enzymatic Alterations of Grapevine Rootstocks in Response to Cadmium Stress // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2025. Vol. 25. Iss. 4. P. 9902-9920. DOI: 10.1007/s42729-025-02765-6

27. *Rasiah V., Florentine S.K.* Characterizing selected soil attributes of different land-use management to assess reforestation benefits of deforested riparian buffers // Ecological Processes. 2018. Vol. 7. № 39. DOI: 10.1186/s13717-018-0151-7

28. *Савич В.И., Белопухов С.Л., Подволоцкая Г.Б. и др.* К вопросу о взаимосвязи почв и поверхностных вод как компонентов ландшафта // Природообустройство. 2018. № 1. С. 76-83. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-1-76-83

29. *Tianbao Ren, Huilin Feng, Wan Mahari W.A. et al.* Biochar and microbial synergy: enhancing tobacco plant resistance and soil remediation under cadmium stress // Biochar. 2025. Vol. 7. № 119. DOI: 10.1007/s42773-025-00535-2

30. *Qin Yao, Yueying Yang, Jia Chen et al.* Soil application of $FeCl_3$ and $Fe_2(SO_4)_3$ reduced grain cadmium concentration in Polish wheat (*Triticum polonicum* L.) // BMC Plant Biology. 2024. Vol. 24. № 930. DOI: 10.1186/s12870-024-05652-x

31. *Wenchao Deng, Guanghui Wang, Bing Wang, Nansheng Deng.* Sulfur Modified Biochar Supported Ferrous Sulfide Composite for the Immobilization of Cadmium in Contaminated Soil // Water, Air, & Soil Pollution. 2024. Vol. 235. Iss. 8. № 495. DOI: 10.1007/s11270-024-07317-9

32. *Jing Ren, Zixuan Zhao, Amjad Ali et al.* Characterization of phosphorus engineered biochar and its impact on immobilization of Cd and Pb from smelting contaminated soils // Journal of Soils and Sediments. 2020. Vol. 20. Iss. 8. P. 3041-3052. DOI: 10.1007/s11368-019-02403-6

33. *Korkmaz H.E., Akgün M., Kocaman A., Korkmaz K.* Mitigating cadmium and salinity stress in lettuce through biochar application: impacts on growth and nutrient dynamics // BMC Plant Biology. 2026. Vol. 26. № 339. DOI: 10.1186/s12870-025-08051-y

34. *Chaw Su Lwin, Young-Nam Kim, Mina Lee et al.* In Situ Immobilization of Potentially Toxic Elements in Arable Soil by Adding Soil Amendments and the Best Ways to Maximize Their Use Efficiency // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2024. Vol. 24. Iss. 1. P. 115-134. DOI: 10.1007/s42729-024-01630-2

35. *Subašić M., Karalija E., Selović A.* Evaluating the impact of intercropping *Silene sendtneri*, a Cd hyperaccumulating plant, on mineral and growth dynamics in *Zea mays* under Cd stress // Plant and Soil. 2025. Vol. 517. Iss. 1. P. 699-716. DOI: 10.1007/s11104-025-07889-3

36. *Лескова О.А., Бондаревич Е.А., Коцюржинская Н.Н.* Накопление и распределение химических элементов в растениях *Taraxacum officinale* Wigg. (Забайкальский край) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2021. Т. 20. № 1. С. 265-268. DOI: 10.14258/pbssm.2021051

37. *Зорикова О.Г., Маняхин А.Ю.* Микроэлементный состав *Patrinia scabiosifolia* и *Patrinia rupestris* // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 277-287. DOI: 10.14258/jcprm.20230411994

38. *Денисова С.Г., Реут А.А.* Расчет коэффициентов накопления мышьяка, свинца и кадмия надземными и подземными органами пионов // Вестник КрасГАУ. 2025. № 4 (193). С. 51-57. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-4-51-57

Авторы: **Наталья Юрьевна Антонинова,** *канд. техн. наук, заведующий лабораторией* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *natal78@list.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-8503-639X*, **Артем Вячеславович Собенин,** *канд. техн. наук, научный сотрудник* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-5513-5680*, **Альберт Исмагилович Усманов,** *канд. техн. наук, научный сотрудник* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3650-0467*, **Ярослава Артемовна Кузнецова,** *младший научный сотрудник* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/ 0000-0002-7808-8474*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0