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*

Использование отходов производства для рекультивации кислых, загрязненных тяжелыми металлами почв арктических территорий

М.А.Чукаева[1]✉, **Я.В.Пухальский**[2]

[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Ленинградский государственный университет им. А.С.Пушкина, Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Чукаева М.А., Пухальский Я.В. Использование отходов производства для рекультивации кислых, загрязненных тяжелыми металлами почв арктических территорий // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 145-157. EDN VFFKFB

Аннотация

В работе изучено влияние мелиорантов на основе отходов производства на эффективность фиторемедиации нарушенных земель. С этой целью в техногенных пустошах Арктического региона были отобраны поверхностные пробы почв, которые отличались кислой реакцией среды, полиметаллическим загрязнением и тяжелым физико-механическим составом. Для их нейтрализации использовалась известь и отходы производства: металлургический шлак, зола от целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) и зола от сжигания альтернативного топлива на основе твердых коммунальных отходов (ТКО). Для оценки эффективности нейтрализации и детоксикации почв в результате внесения различных доз мелиорантов определяли pH водной и солевой вытяжек исходной почвы и полученных почвосмесей и содержание в них подвижных и водорастворимых форм тяжелых металлов. Для интегральной оценки пригодности почвосмесей для фиторемедиации проводился вегетационный эксперимент с выращиванием горчицы сарептской (*Brassica juncea*), последующей оценкой биометрических показателей ее наземной биомассы и определением интенсивности аккумуляции тяжелых металлов побегами и корнями растений. Горчица проявила высокую толерантность к полиметаллическому загрязнению, хорошую всхожесть и выживаемость. Выявлено, что основным механизмом снижения опасности загрязненных почв является фитостабилизация. Установлен высокий потенциал изученных отходов производства в сравнении с традиционным мелиорантом для нейтрализации кислых почв, загрязненных тяжелыми металлами. Отмечено снижение кислотности почв, улучшение их физико-механических свойств и элементного состава. Для получения продуктивных почвосмесей экспериментально установлены диапазоны доз внесения изученных отходов производства в кислые почвы, загрязненные тяжелыми металлами, а также длительность периода обработки: 16-33 г/кг шлака с предварительной нейтрализацией за 8 недель; 7-14 г/кг золы ТКО и 20-39 г/кг золы ЦБК с предварительной нейтрализацией за 3-4 недели. В дальнейшем предполагается изучение влияния дополнительного внесения в загрязненные почвы гуминовых и фульвокислот.

Ключевые слова

фиторемедиация; фитотоксичность; кислая почва; тяжелые металлы; горчица сарептская (*Brassica juncea*); отходы производства; шлак; зола; Арктическая зона

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRW-2024-0005 «Новые подходы к проведению экологического мониторинга арктических экосистем, подверженных влиянию объектов минерально-сырьевого комплекса, и разработка технологий их комплексного восстановления»).

Поступила: 09.04.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 02.09.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Почвы в регионах Арктики и Субарктики формируются в условиях сурового климата под влиянием многолетней мерзлоты и связанных с ней мерзлотных процессов. Почвы здесь характеризуются слабым развитием почвенного процесса, небольшой толщиной профиля и слабой структурированностью, ярко выраженным глеевым горизонтом, а также деформациями, вызванными перемещением влажных почвенных масс при циклах замерзания и оттаивания [1, 2]. Одними из наиболее опасных поллютантов арктических почв из-за высокой токсичности, устойчивости в окружающей среде и способности к биологической миграции являются тяжелые металлы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В настоящее время для очистки почв от этих элементов применяются химические методы, такие как выщелачивание и преобразование металлов в труднодоступные формы. Однако эти подходы не всегда дают желаемые результаты и часто являются дорогостоящими [3, 4].

Химическое загрязнение арктических почв в большинстве случаев сопряжено с их опустыниванием и сильными эрозионными процессами. Результаты исследований, проведенных российскими и зарубежными учеными [5-7], свидетельствуют о невозможности естественного восстановления техногенных пустошей арктических территорий. Существенным препятствием для этого, помимо высокого уровня загрязнения и сильной трансформации экотопов в результате техногенной деятельности, является отсутствие источников семян как пионерных, так и позднесукцессионных видов растений в связи со сложными климатическими условиями, огромными площадями нарушенных земель и ограниченными возможностями расселения этих видов.

Существует целый ряд исследований, свидетельствующих о возможности применения фитотехнологий для рекультивации нарушенных земель в условиях Арктики [8-10]. Например, на полигоне Заполярный (Мурманская обл.) проводились работы по созданию искусственного фитоценоза на техногенном грунте с применением термовермикулита и мелиорантов из горно-промышленных отходов, содержащих серпентиновые и другие минералы, и высадкой многолетних злаков (пырей сизый, овсяница красная, тимофеевка луговая) [11]. В окрестностях Норильска проводились многолетние опыты по биологической рекультивации нарушенных земель с высаживанием черенков различных видов ив, ряд из которых показал высокую приживаемость и хороший рост [12]. На опытных участках, расположенных в зоне техногенных пустошей вблизи Мончегорска (Мурманская обл.) была проведена ремедиация нарушенных земель с высадкой лиственных древесно-кустарниковых пород (ивы и березы) и посевом многолетних трав с последующим изучением долговременной динамики [13, 14]. Актуальным является использование технологий фиторемедиации для восстановления и очистки загрязненных и нарушенных почв арктических территорий.

Как правило, почвы с высоким уровнем полиметаллического загрязнения также характеризуются кислой реакцией среды, что является значимым лимитирующем фактором при их фиторемедиации [15, 16]. Для восстановления таких земель необходима их нейтрализация, которая, помимо снижения кислотности почв, может также способствовать улучшению физико-механических свойств и снижению миграционной способности тяжелых металлов, а, следовательно, и их опасности для растений. К наиболее распространенным и действенным способам нейтрализации кислых почв относится известкование [17, 18]. Одним из основных мелиорантов, применяемых для известкования, является молотый известняк (известковая мука). К природным известковым удобрениям относятся также молотый доломит, мергель, мел, жженая известь (негашеная и гашеная), известковый туф (ключевая известь), гажа (озерная известь) [19].

Большой интерес для реализации ресурсосберегающих технологий, снижения количества накопленных отходов, а также стоимости проводимых рекультивационных мероприятий, представляет использование отходов производства для известкования кислых почв. К уже известным и нашедшим применение в известковании можно отнести отходы, образующиеся при сжигании горючего сланца (сланцевая зола) и торфа (торфяная зола), при получении бытового газа в камерных печах (сланцевый кокс), отходы алюминиевого производства (белитовый шлам), цементных заводов (цементная пыль) и свеклосахарного производства (дефекат) [20-22]. К менее изученным, но не менее распространенным и потенциально пригодным для известкования отходам можно отнести также золу от сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО) и золу от целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК), металлургический шлак. Использование двух последних видов отходов для восстановления нарушенных земель арктических территорий представляется особенно актуальным ввиду наличия здесь металлургических предприятий (Кольская ГМК, ГМК «Норильский никель») и крупного целлюлозно-бумажного комбината (Архангельский ЦБК). Для решения проблемы утилизации ТКО, особенно острой для Арктической зоны, российскими учеными активно ведутся разработки в области технологии W2E (Waste to Energy) [23-25]. В результате термической переработки отходов на выходе, наряду с энергией, получаются сопутствующие продукты, в том числе зола, которая может быть использована в качестве нейтрализующего мелиоранта.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Цель работы – изучение влияния нейтрализующих мелиорантов на основе отходов производства на эффективность фиторемедиации нарушенных земель и выявление оптимальных доз их внесения на основе анализа и обобщения биометрических данных и элементного состава горчицы сарептской (*Brassica juncea*), выращенной на загрязненных почвах арктических территорий.

Методы

Для проведения исследований были отобраны пробы из поверхностного горизонта малогумусных загрязненных почв подзолистого типа, с характерными для техногенных пустошей Арктического региона особенностями: высоким содержанием тяжелых металлов, кислой реакцией среды и значительной долей физической глины (частиц размером менее 0,01 мм). Все отобранные пробы были объединены с получением усредненного модельного образца почвы, который охлаждался и хранился при температуре +4 °С. Из модельного образца почвы была отобрана представительная лабораторная проба для дальнейших исследований в лаборатории мониторинга и восстановления арктических экосистем Санкт-Петербургского горного университета.

Гранулометрический состав почвы определяли в соответствии с ГОСТ 12536-2014. Пробоподготовка почвы для химического анализа проводилась в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. Проба высушивалась до воздушно-сухого состояния, измельчалась в ступке и просеивалась через сито с диаметром ячеек 1 мм. Влажность почвы определялась на термогравианализаторе TGA 701 (Leco, США) в соответствии с ГОСТ 28268-89. Определение валового содержания металлов и их подвижных и водорастворимых форм проводилось в соответствии с М-МВИ-80-2008 на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). Подвижные формы извлекались ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8. Водородный показатель определялся для водной и солевой почвенных вытяжек в соответствии с ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26483-85, соответственно. Для расчета дозы внесения нейтрализующих добавок определялась гидролитическая кислотность по Каппену в соответствии с ГОСТ 26212-2021.

Для интегральной оценки загрязнения модельного образца почвы тяжелыми металлами был рассчитан суммарный показатель уровня загрязнения по СанПиН 1.2.3685-21:

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

где K_c – коэффициент концентрации металлов, мг/кг; n – число оцениваемых ингредиентов.

Коэффициент концентрации для каждого металла рассчитывался как отношение его фактической концентрации в почве к установленному нормативному значению ПДК (ОДК).

Для нейтрализации модельного образца почвы были взяты молотый известняк с фракцией ≤ 1 мм (в качестве традиционного мелиоранта) и отходы производства, актуальные для Арктической зоны: металлургический шлак с фракцией ≤ 1 мм, зола от ЦБК и зола от сжигания альтернативного топлива на основе ТКО. Для каждого мелиоранта была определена нейтрализующая способность в соответствии с ISO 20978:2020.

Расчетная доза карбоната кальция, необходимая для нейтрализации модельного образца почвы, вычислялась по формуле:

$$Д_{CaCO_3} = Н_г \cdot 0{,}5,$$

где $Н_г$ – величина гидролитической кислотности почвы по Каппену, мг·экв/100 г; 0,5 – коэффициент перевода миллиграммов в граммы; расчетная доза $Д_{CaCO_3}$ = 7,85 г/кг.

Доза внесения каждого вида мелиоранта в физической массе рассчитывалась по формуле:

$$Д_{ф.м} = (Д_{CaCO_3} \cdot 10^6) / (Н(100 - W)\ (100 - К),$$

где Н – нейтрализующая способность мелиоранта по $CaCO_3$, %; W – влажность удобрения, %; К – количество частиц крупнее 1 мм, %.

На первом этапе исследований помимо рассчитанных целых доз мелиорантов было решено изучить влияние половинных и двойных доз. Поскольку исходная почва отличалась значительным содержанием частиц размером менее 0,01 мм, высокой плотностью и слабой дренируемостью, для улучшения ее физико-механических свойств было принято решение добавить 10 % по массе

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

измельченного вермикулита с размером частиц не более 5 мм, крупное месторождение которого расположено в Мурманской обл. Для проведения процесса нейтрализации и подготовки к вегетационному эксперименту в 13 контейнеров помещалось по 1000 г подготовленной почвосмеси с влажностью, равной 50 % от полной полевой влагоемкости, по 100 г измельченного вермикулита и вносились половинные, одинарные и двойные дозы мелиорантов (всего 12 опытных вариантов). Один образец использовался в качестве холостого, в него нейтрализатор не вносился. Процесс нейтрализации проводился в течение одного месяца с периодическим поливом образцов деминерализованной водой. По истечении периода инкубации содержимое каждого контейнера было тщательно перемешано и усреднено. Из каждой полученной почвосмеси отбиралась представительная проба, для которой определялся pH водной и солевой вытяжек, а также содержание подвижных и водорастворимых форм металлов аналогично тому, как описано выше.

Для проведения вегетационного эксперимента было решено использовать горчицу сарептскую (*Brassica juncea*) по ряду причин:

• по результатам литературного обзора горчица сарептская отличается высокой толерантностью к полиметаллическому загрязнению и является гипераккумулятором ряда тяжелых металлов [26, 27];

• пригодна для возделывания на бедных почвах с реакцией среды от слабокислотной до щелочной, холодостойка и засухоустойчива, способна произрастать в суровых климатических условиях Арктики [28];

• является сидератом, т.е. способна обогащать почву питательными веществами и улучшать ее структуру, что благоприятно скажется в дальнейшем на состоянии почв и будет способствовать естественным процессам зарастания нарушенных территорий, минимизируя эрозионные процессы [29, 30];

• характеризуется быстрым ростом и набором биомассы, способна интенсивно накапливать тяжелые металлы уже на ювенильной стадии развития, что важно для короткого вегетационного периода Арктической зоны [31].

Для постановки вегетационного эксперимента по 100 г полученных почвосмесей помещались в контейнеры с индивидуальными ячейками, по 9 повторностей для каждого варианта. В качестве контроля был взят универсальный почвогрунт, для которого также определялись pH водной и солевой вытяжек и содержание металлов аналогично описанному выше. Горчица сарептская высеивалась по 9 семян в каждую ячейку, что соответствовало рекомендованной норме высева 250 г на 10 м^2. Кассеты помещали в закрытый климатический гроубокс с вентиляцией и интенсивной светокультурой. Температуру воздуха внутри рабочей зоны бокса поддерживали на уровне +15 °C днем и +8 °C ночью, относительную влажность 37 и 85 %, соответственно. Фотопериод имел продолжительность 12 ч. Периодический полив производили с использованием низкоминерализованной воды.

Для проведения вегетационного эксперимента в качестве технологии фитоэкстракции была выбрана естественная или непрерывная, как наиболее доступная (по сравнению с индуцированной), не требующая внесения дополнительных дорогостоящих добавок [32]. Из-за высокого содержания подвижных и водорастворимых форм тяжелых металлов в модельном образце почвы дополнительная стимуляция перехода в биодоступные формы не требуется. Удобрения также было решено не вносить, чтобы рассмотреть возможность рекультивации нарушенных земель с минимальными затратами и минимальным внешним воздействием на хрупкие арктические экосистемы.

Через 6 недель вегетации растения были срезаны, извлечена корневая система и промыта дистиллированной водой. Измерены биометрические показатели наземной биомассы (длина и масса побегов) для каждой ячейки в отдельности, после чего данные усреднены. Затем собранные растения были высушены до воздушно-сухого состояния (отдельно побеги с листьями, отдельно корни) и измельчены в агатовой ступке. Из полученных проб были отобраны навески по 0,1 г и проведено мокрое озоление с использованием концентрированной азотной кислоты (2 мл) и перекиси водорода (2 мл) в системе микроволнового разложения Multiwave 3000 (Anton Paar, Австрия). После остывания растворы количественно переносились в мерные полиэтиленовые пробирки на 20 мл и доводились до метки дистиллированной водой. Для всех образцов велись две

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

параллельные пробы, а также готовились холостые растворы с использованием тех же реактивов. Полученные растворы анализировались методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). Для определения интенсивности аккумуляции тяжелых металлов в условиях каждой полученной почвосмеси производился расчет коэффициента биологической аккумуляции (BAC), представляющий отношение концентрации химических элементов-загрязнителей в воздушно-сухой массе растений к концентрации их подвижных форм в субстрате. Коэффициент биологической аккумуляции вычислялся отдельно для побегов и корней растений. Для оценки эффективности транспорта элементов из подземных в надземные органы растения рассчитывался коэффициент транслокации T_F, представляющий отношение концентрации химических элементов-загрязнителей в побегах к их концентрации в корнях растений.

Важной характеристикой успешной нейтрализации кислых почв является длительность поддержания полученного эффекта [33]. Поэтому после проведения вегетационного эксперимента повторно измерялся водородный показатель для водных и солевых вытяжек из почвосмесей.

На основании результатов, полученных после первого этапа исследований, было решено изучить внесение 1/4, 1/8 и 1/16 от расчетных доз мелиорантов на основе отходов производства, всего 9 вариантов. Время предварительной нейтрализации было увеличено до двух месяцев.

Обсуждение результатов

По результатам гранулометрического анализа, с учетом подзолистого типа почвообразования, изученный модельный образец почвы классифицируется по Н.А.Качинскому как средний суглинок. Преобладающей фракцией является средняя пыль (39 %), второе место по содержанию – крупная пыль (24 %). По результатам определения водородного показателя для водной и солевой почвенных вытяжек из модельного образца почвы $pH_{в.в}$ = 4,71, pH_{KCl} = 3,52, изучаемый образец можно характеризовать как сильнокислый. Кислотность по Каппену составила 15,7 мг·экв/100 г. Результаты определения содержания основных металлов в модельном образце почвы представлены в табл.1.

По данным табл.1 и значениям Z_c = 42 для валового содержания металлов и Z_c = 187 для их подвижных форм степень загрязнения изученного образца почвы относится к опасной и чрезвычайно опасной категориям. Можно отметить низкое содержание питательных элементов (K, Ca и Mg).

Таблица 1

Показатели средних значений элементного профиля в модельной пробе почвы

Элемент	Валовое содержание[1], мг/кг / ПДК (ОДК)[2]	Подвижная форма[1], мг/кг / ПДК (ОДК)[2]	Водорастворимая форма[1], мг/кг
Al	36396 / н/н[3]	218 / н/н	4,7
Ba	402 / н/н	18 / н/н	0,25
Ca	12060 / н/н	199 / н/н	50
Cd	13 / 1,0	2,5 / н/н	0,12
Co	71 / н/н	1,8 / 5,0	0,12
Cr	595 / н/н	1,0 / 6,0	0,036
Cu	1595 / 66	427 / 3,0	7,2
Fe	47392 / н/н	23 / н/н	3,4
K	8458 / н/н	24 / н/н	5,3
Mg	12287 / н/н	165 / н/н	21
Mn	962 / 1500	64 / 60	3,7
Na	9251 / н/н	5,6 / н/н	4,6
Ni	255 / 40	8,4 / 4,0	0,41
Pb	128 / 65	2,1 / 6,0	0,13
Sr	141 / н/н	1,9 / н/н	0,42
Zn	784 / 110	377 / 23	13

Примечания: 1. По методике М-МВИ-80-2008, погрешность для всех форм и элементов – 30 %
2. По СанПиН 1.2.3685-21.
3. Не нормируется.

Результаты определения нейтрализующей способности, а также расчета доз внесения нейтрализующих мелиорантов представлены в табл.2.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Нейтрализующая способность известковых материалов и расчетные дозы внесения

Мелиорант	CaO, %	$CaCO_3$, %	$Д_{ф.м}$, г/кг
Известь, $d \leq 1$ мм	22,2	39,6	19,8
Шлак, $d \leq 1$ мм	6,7	12,0	65,6
Зола ТКО	7,8	13,9	56,4
Зола ЦБК	5,6	10,0	78,5

Результаты исследования модельных образцов почвы после нейтрализации представлены на рис.1. В холостом варианте (почва + вермикулит без нейтрализующего мелиоранта) по сравнению с исходным модельным образцом почвы не выявлено значимых изменений кислотности, содержания водорастворимых и подвижных форм металлов. Во всех почвосмесях с добавлением мелиорантов (рис.1) произошло значимое увеличение водородного показателя и полученные почвосмеси находятся в диапазоне от умерено кислых до щелочных. При этом наиболее быстрым и сильным нейтрализатором показали себя золы ТКО и ЦБК. Даже половинная доза этих мелиорантов привела к избыточному защелачиванию почвы, вероятно, это связано с мелким размером частиц и тем, что нейтрализующие агенты находятся в них в гидроксидной форме. Положительный эффект от внесения в почву золы ЦБК также может быть обусловлен повышением содержания P, N и органического C, содержащихся в данном виде отходов. Кроме того, было отмечено увеличение водоудерживающей способности почвосмесей с добавлением этих мелиорантов, что также является благоприятным фактором. Наиболее слабым нейтрализатором оказался шлак, внесение его одинарной дозы оказалось достаточным для получения нейтральной по уровню кислотности почвосмеси. Внесение половинной дозы шлака позволило нейтрализовать модельный образец почвы до умеренно кислой. Известь показала результаты нейтрализации лучшие по сравнению со шлаком: для получения почвосмеси нейтральной, по уровню кислотности, достаточно внесения ее половинной дозы. При оценке длительности поддержания эффекта нейтрализации, был отмечен рост pH во всех образцах почвосмесей после проведения вегетационного эксперимента, причем наиболее значимо возрос pH в образцах, где в качестве нейтрализатора вносили шлак.

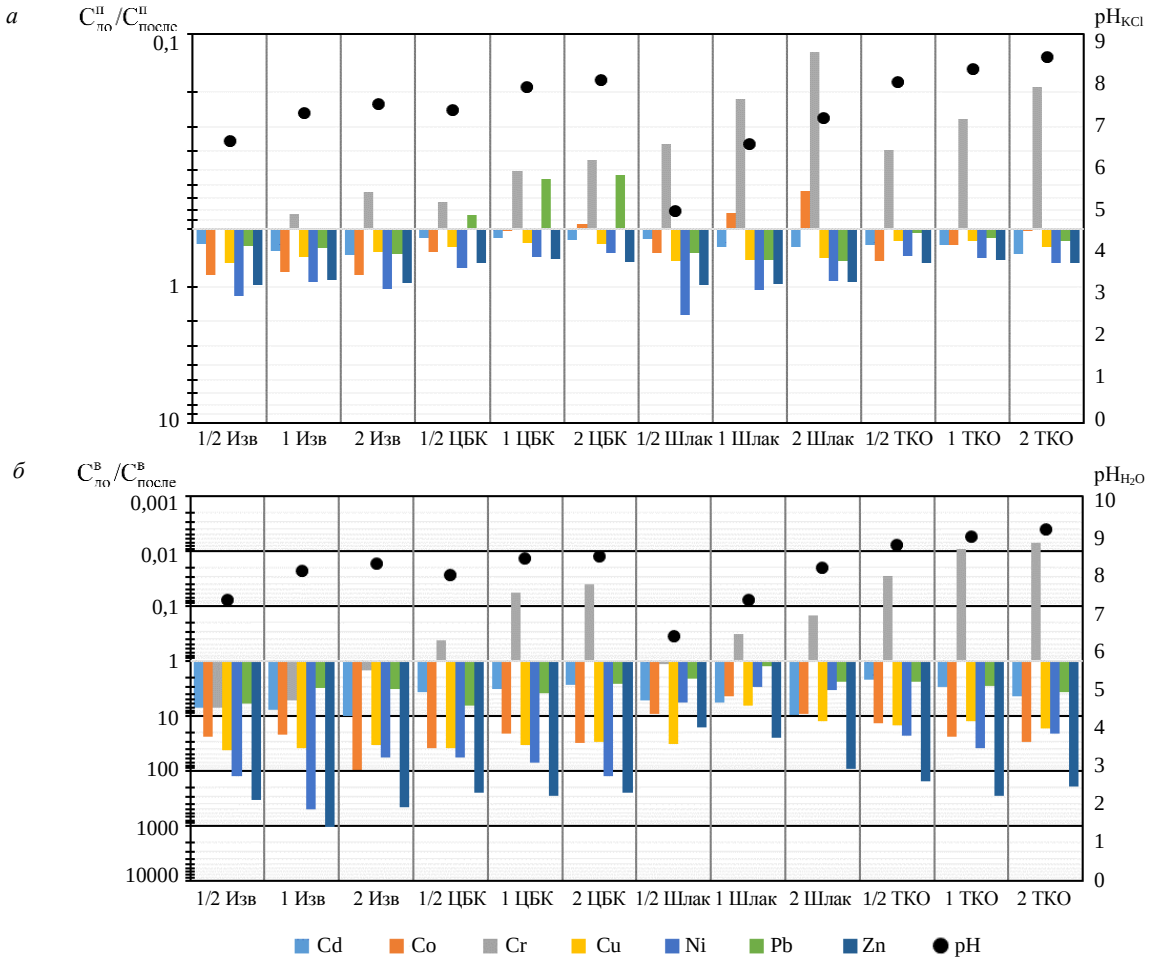


Рис.1. Отношение содержания подвижных (*а*) и водорастворимых (*б*) форм тяжелых металлов в почвах до и после процесса нейтрализации ($C^{п}$, $C^{в}$) и pH солевой и водной вытяжек (эксперимент 1)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Помимо кислотности, важным фактором для успешного возделывания растительных культур на загрязненных почвах является содержание подвижных и водорастворимых форм тяжелых металлов. Из рис.1, *а* видно, что снижение содержания подвижных форм металлов незначительно, а во всех полученных почвосмесях возросла концентрация подвижных форм Cr, очевидна тенденция ее роста с увеличением водородного показателя. Наибольший прирост подвижных форм Cr отмечен при добавлении к почве шлака и золы ТКО. В отдельных вариантах почвосмесей отмечен также незначительный рост подвижных форм Co и Pb. Вероятно, это связано с содержанием данных элементов в самих мелиорантах. Важно отметить, что даже в этих случаях концентрации подвижных форм Cr, Pb и Co в полученных почвосмесях не превышают предельно допустимых значений согласно СанПиН 1.2.3685-21. При этом для всех водорастворимых форм тяжелых металлов, кроме Cr, можно наблюдать тенденцию снижения миграционной способности (рис.1, *б*). Во всех полученных после нейтрализации почвосмесях наиболее сильно (в 10-1000 раз) уменьшилось содержание водорастворимых форм Zn, Co, Ni и Cu, что может благоприятно сказаться на всхожести и выживаемости высаживаемых растений.

Результаты второго эксперимента со скорректированными дозами внесения и продолжительностью предварительной нейтрализации почвосмесей представлены на рис.2.

Из рис.2 видно, что благодаря большей продолжительности предварительной нейтрализации почв даже 1/16 от расчетной дозы внесения шлака достаточно для получения почвы со слабокислой реакцией среды, однако в этом случае значительно снижается эффективность связывания тяжелых металлов и резко возрастает количество их водорастворимых форм по сравнению с почвосмесями, полученными внесением 1/8 и 1/4 доз шлака. Схожая ситуация наблюдается и при внесении золы ЦБК. В остальных вариантах почвосмесей, как и в первом эксперименте, отмечено снижение всех водорастворимых и подвижных форм металлов, кроме Cr.

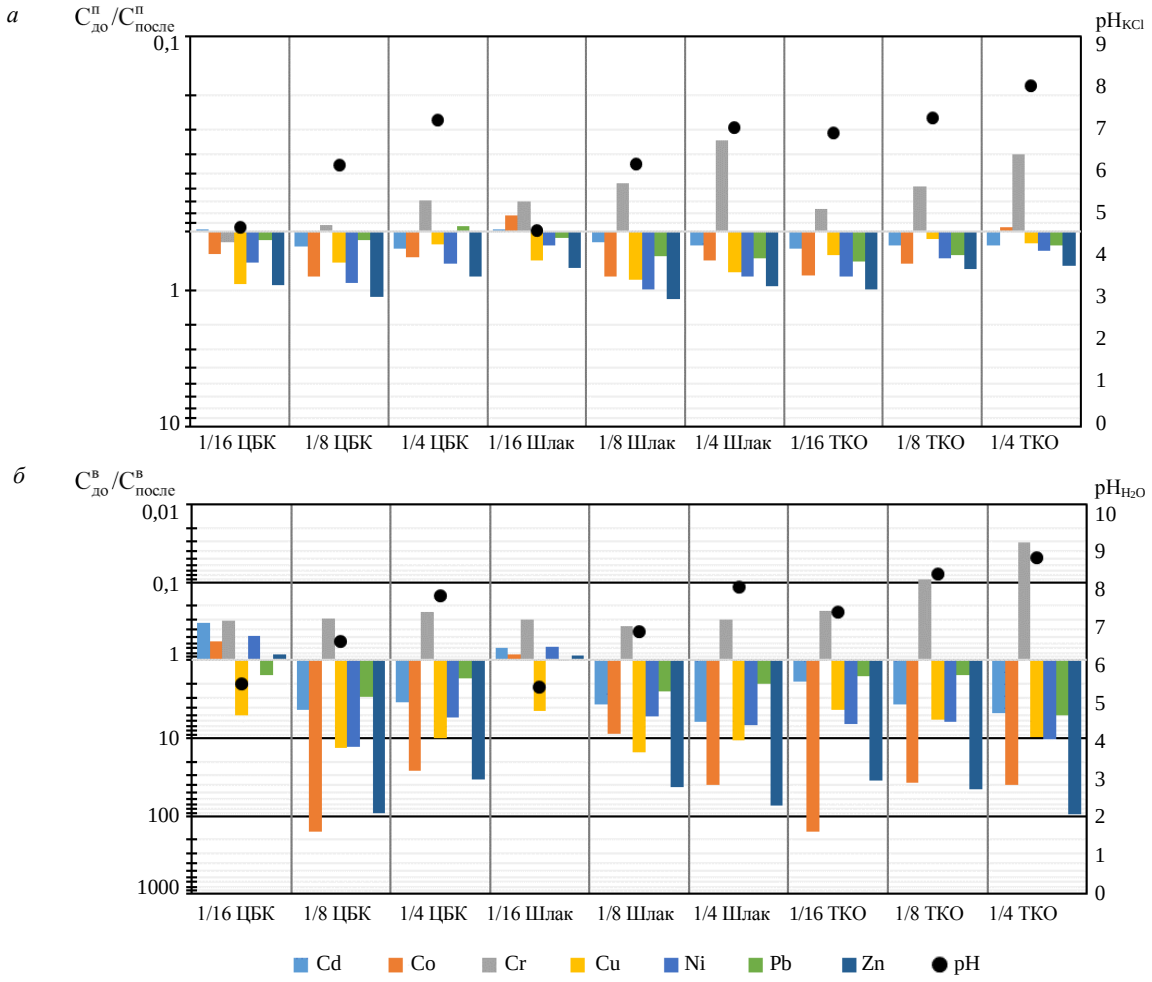


Рис.2. Отношение содержания подвижных (*а*) и водорастворимых (*б*) форм тяжелых металлов в почвах до и после процесса нейтрализации ($C^{п}$, $C^{в}$) и pH солевой и водной вытяжек (эксперимент 2)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 145-157
© М.А.Чукаева, Я.В.Пухальский, 2026

В первом эксперименте во всех вариантах опыта, кроме холостого (почва + вермикулит без нейтрализующего мелиоранта) семена проросли на 4-й день после посадки. Средняя всхожесть составила 75 %. В холостом опыте всходы появились на 7-й день после посадки, но дальнейшего развития растений не произошло. Во всех остальных вариантах была отмечена задержка развития по сравнению с контролем: настоящие листья появлялись позднее и были более мелкие, побеги ниже, междоузлия короче. По истечении 5 недель фаза цветения наступила у растений, высаженных в модельные образцы почв с добавлением зол ЦБК и ТКО, а также в контрольном образце универсального почвогрунта. У растений, высаженных в модельные образцы почв с добавлением шлака и извести, цветение растений отмечено через 6 недель после посева. Вероятно, такая тенденция связана с обогащением почвы питательными элементами, содержащимися в золах, что благоприятно сказывается на развитии растений.

Во втором вегетационном эксперименте с меньшими дозами внесения нейтрализаторов наблюдалась схожая картина. Однако при внесении 1/16 дозы шлака и 1/16 дозы золы ЦБК отмечено снижение всхожести до 60%, задержка появления всходов (только на 5-6 день после посадки) и последующая остановка их развития. Это согласуется с данными химического анализа полученных почвосмесей (рис.2), согласно которым в рассматриваемых вариантах наблюдается повышенное содержание подвижных и водорастворимых форм тяжелых металлов.

Результаты измерения биометрических показателей наземной биомассы растений приведены в табл.3.

Таблица 3

Усредненные для 9 повторностей биометрические показатели наземной биомассы растений

Образец	Средняя длина побега, см	Средняя масса побегов, г	Достижение генеративной стадии
Контроль (универсальный почвогрунт)	29	2,7250	Да
1/2 Известь	11	0,7735	Да
1 Известь	11	0,8319	Да
2 Известь	12	0,9069	Да
1/16 Шлак	1	0,0851	Нет
1/8 Шлак	8	0,6698	Нет
1/4 Шлак	9	0,7041	Да
1/2 Шлак	10	0,7338	Да
1 Шлак	10	0,8406	Да
2 Шлак	11	0,8865	Да
1/16 ТКО	7	0,5512	Нет
1/8 ТКО	8	0,5584	Да
1/4 ТКО	10	0,6155	Да
1/2 ТКО	10	0,6287	Да
1 ТКО	9	0,6129	Да
2 ТКО	8	0,6038	Да
1/16 ЦБК	1	0,0602	Нет
1/8 ЦБК	10	0,8656	Нет
1/4 ЦБК	11	0,9985	Да
1/2 ЦБК	12	1,0356	Да
1 ЦБК	10	0,8110	Да
2 ЦБК	9	0,7211	Да

Как видно из табл.3, для всех образцов полученных почвосмесей можно отметить снижение биологической продуктивности по сравнению с универсальным почвогрунтом. Однако достижение генеративной стадии растениями в большинстве вариантов опыта свидетельствует о высоком потенциале полученных почвосмесей, а также горчицы сарептской для создания противоэрозионного покрова нарушенных территорий Арктической зоны. Как уже было отмечено выше, низкая продуктивность почвосмесей, полученных внесением 1/16 дозы шлака и 1/16 дозы золы ЦБК, связана с высокой токсичностью этих образцов. Снижение биологических показателей растений и отсутствие цветения через 6 недель после посева в остальных образцах со сниженными дозами внесения мелиорантов, вероятно, связано со структурой почвосмесей и низким количеством питательных компонентов, что согласуется с предположением о комбинированном действии выбранных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

мелиорантов. Максимальные значения биомассы были зафиксированы в вариантах опыта с добавлением к модельному образцу почвы золы ЦБК в количестве 1/2 от расчетной дозы внесения. Это объясняется, с одной стороны, оптимальным значением pH полученной почвосмеси, с другой, улучшением ее физико-механических свойств и повышением питательности за счет ценных макро-, микро- и органических элементов, содержащихся в золе, а также снижением токсичности за счет уменьшения миграционной способности тяжелых металлов.

Наиболее сильным мелиорантом проявила себя зола ТКО, даже 1/16 от расчетной дозы ее внесения достаточно для корректировки кислотности почвы и снижения биодоступности тяжелых металлов. Однако ее применение в сравнении с другими изучаемыми мелиорантами показало меньшую эффективность. С одной стороны, при внесении больших доз золы ТКО происходит чрезмерное защелачивание почвы и увеличение содержания биодоступных форм Cr, входящего в состав мелиоранта, с другой, низкие дозы внесения не обеспечивают необходимого улучшения физико-механических свойств почвы и повышения ее питательности.

Результаты измерения водородного показателя почвосмесей после проведения вегетационного эксперимента представлены на рис.3.

Как видно из рис.3, *а*, *б*, в первом эксперименте после окончания отмечается значительный рост pH в почвосмесях, полученных добавлением шлака, что согласуется с предположением о его пролонгированном воздействии. При этом в остальных образцах рост водородного показателя не значителен. При увеличении срока предварительной нейтрализации от 1 до 2 мес., процесс протекает более полно (рис.3, *в*, *г*), что позволяет скорректировать дозу внесения шлака [34].

Результаты расчета коэффициентов биологической аккумуляции тяжелых металлов горчицей сарептской (BAC) и коэффициента транслокации приведены в табл.4. Ввиду незначительной биомассы корней и побегов в почвосмеси с внесением 1/16 дозы золы ЦБК, а также корней в почвосмеси с внесением 1/16 дозы шлака содержание тяжелых металлов в них не определялось.

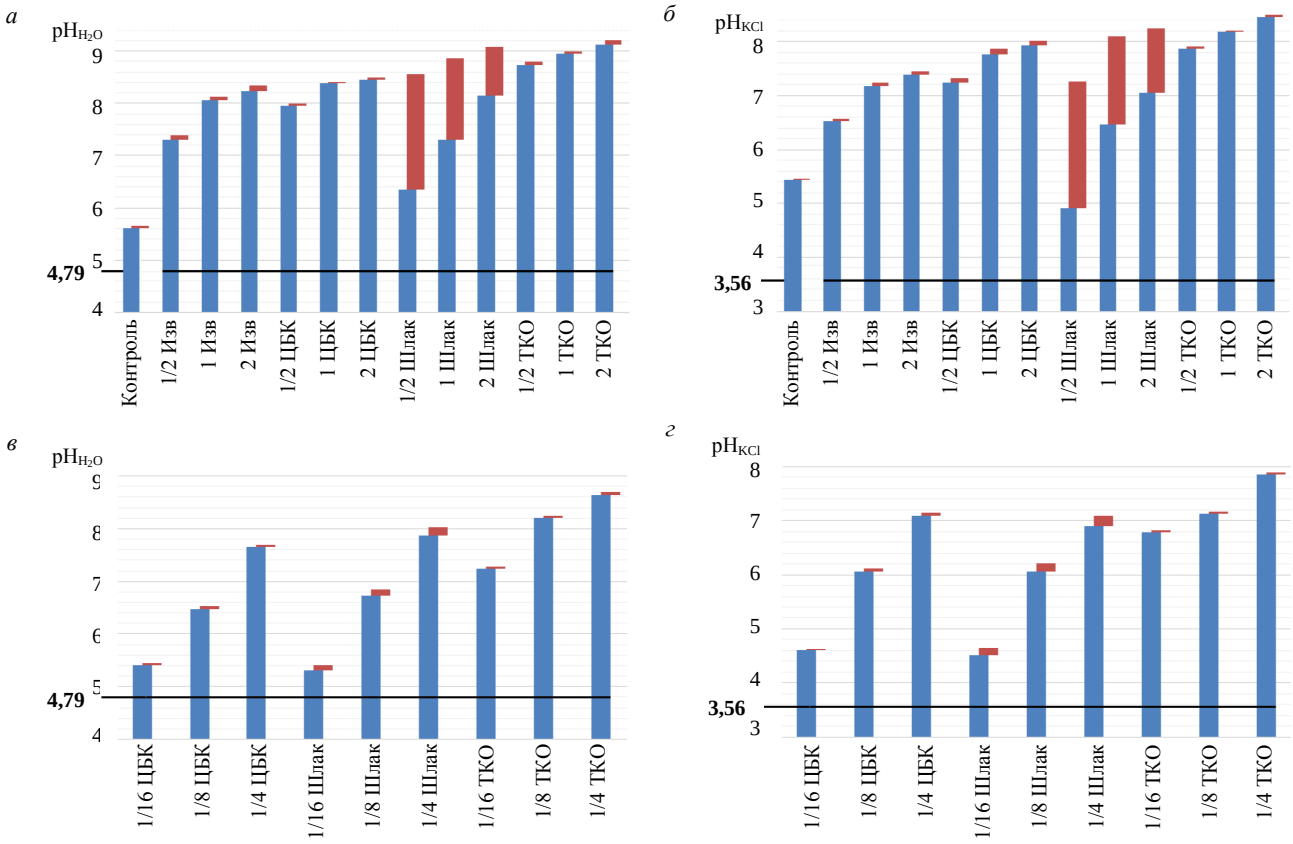


Рис.3. Динамика изменения водородного показателя в почвосмесях после проведения вегетационного эксперимента:
а – pH водной вытяжки; *б* – pH солевой вытяжки (эксперимент 1);
в – pH водной вытяжки; *г* – pH солевой вытяжки (эксперимент 2)

4,79 (3,56) – значение pH модельного образца почвы до нейтрализации,
■ – значение pH почвосмесей перед вегетационным экспериментом; ■ – значение pH почвосмесей после вегетационного эксперимента

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 4

Коэффициенты биологической аккумуляции тяжелых металлов побегами и корнями горчицы сарептской из почвосмесей и контрольного образца почвы

Образец / Элемент	BAC Побеги/Корни ‖ T_F						
	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Контроль	13/28 ‖ 0,46	7/40 ‖ 0,18	28/114 ‖ 0,22	5/101 ‖ 0,05	24/105 ‖ 0,23	2 / 7 ‖ 0,29	10 / 12 ‖ 0,83
1/2 Известь	4,4/7,1 ‖ 0,62	0,25/8,7 ‖ 0,36	2,0/45 ‖ 0,04	0,08/1,6 ‖ 0,05	0,72/16 ‖ 0,05	0,42/7,8 ‖ 0,05	0,78/1,1 ‖ 0,71
1 Известь	4,9/7,4 ‖ 0,66	0,15/6,7 ‖ 0,02	1,1/20 ‖ 0,06	0,09/1,1 ‖ 0,08	0,52/12 ‖ 0,04	0,58/7,5 ‖ 0,08	0,65/0,94 ‖ 0,69
2 Известь	5,0/6,8 ‖ 0,74	0,18/6,6 ‖ 0,03	1,6/26 ‖ 0,06	0,09/1,1 ‖ 0,08	1,6/16 ‖ 0,1	0,76/9,4 ‖ 0,08	0,60/0,92 ‖ 0,65
1/16 Шлак	4,0/ – ‖ –	5,7/ – ‖ –	17/ – ‖ –	1,9/ – ‖ –	8,9/ – ‖ –	9,3/ – ‖ –	3,4/ – ‖ –
1/8 Шлак	4,1/5,1 ‖ 0,80	2,3/7,0 ‖ 0,33	0,71/17 ‖ 0,04	0,32/2,4 ‖ 0,13	1,4/58 ‖ 0,02	0,85/9,1 ‖ 0,09	0,94/1,4 ‖ 0,67
1/4 Шлак	3,5/5,4 ‖ 0,65	1,0/7,2 ‖ 0,14	0,88/29 ‖ 0,03	0,34/2,8 ‖ 0,12	1,1/36 ‖ 0,03	0,7/8,2 ‖ 0,09	1,1/1,3 ‖ 0,85
1/2 Шлак	3,1/5,4 ‖ 0,57	0,38/7,6 ‖ 0,05	1,1/29 ‖ 0,04	0,11/2,0 ‖ 0,06	1,4/24 ‖ 0,06	0,66/8,5 ‖ 0,08	0,91/1,5 ‖ 0,61
1 Шлак	2,4/2,6 ‖ 0,92	0,15/2,3 ‖ 0,07	0,6/10 ‖ 0,06	0,08/0,88 ‖ 0,09	1,1/12 ‖ 0,09	0,57/10,0 ‖ 0,06	0,58/0,89 ‖ 0,65
2 Шлак	2,1/2,6 ‖ 0,81	0,05/1,7 ‖ 0,03	0,2/4,4 ‖ 0,05	0,08/1,0 ‖ 0,08	1,0/11 ‖ 0,09	0,50/6,5 ‖ 0,08	0,52/0,86 ‖ 0,60
1/16 ТКО	6,8/8,0 ‖ 0,85	0,72/6,8 ‖ 0,11	1,0/13 ‖ 0,08	0,28/2,4 ‖ 0,12	0,76/6,6 ‖ 0,12	1,6/11 ‖ 0,15	1,2/1,5 ‖ 0,80
1/8 ТКО	6,3/7,2 ‖ 0,88	0,42/6,1 ‖ 0,07	1,7/15 ‖ 0,11	0,32/1,9 ‖ 0,17	0,56/7,8 ‖ 0,70	1,6/10 ‖ 0,16	0,71/1,0 ‖ 0,71
1/4 ТКО	4,1/6,9 ‖ 0,59	0,43/5,5 ‖ 0,08	2,2/28 ‖ 0,08	0,34/2,1 ‖ 0,16	0,70/7,5 ‖ 0,09	1,3/9,3 ‖ 0,16	0,69/1,2 ‖ 0,58
1/2 ТКО	3,5/6,8 ‖ 0,51	0,25/5,5 ‖ 0,05	2,0/38 ‖ 0,05	0,11/1,2 ‖ 0,09	0,58/11 ‖ 0,05	0,82/9,7 ‖ 0,08	0,43/1,1 ‖ 0,39
1 ТКО	2,7/5,1 ‖ 0,53	0,25/4,5 ‖ 0,06	2,0/40 ‖ 0,05	0,12/1,0 ‖ 0,12	0,59/10 ‖ 0,06	0,90/8,4 ‖ 0,11	0,42/0,87 ‖ 0,48
2 ТКО	2,1/4,2 ‖ 0,50	0,18/2,7 ‖ 0,07	1,8/39 ‖ 0,05	0,10/0,86 ‖ 0,12	0,81/7,1 ‖ 0,11	0,27/6,9 ‖ 0,04	0,47/0,79 ‖ 0,59
1/8 ЦБК	9,2/10 ‖ 0,92	0,86/11 ‖ 0,08	2,0/27 ‖ 0,07	0,32/3,0 ‖ 0,11	0,91/11 ‖ 0,08	2,0/17 ‖ 0,12	1,3/2,1 ‖ 0,62
1/4 ЦБК	8,8/8,9 ‖ 0,99	0,47/6,8 ‖ 0,07	1,8/25 ‖ 0,07	0,27/2,9 ‖ 0,09	0,94/10 ‖ 0,09	1,6/14 ‖ 0,11	0,88/2,2 ‖ 0,40
1/2 ЦБК	4,9/9,3 ‖ 0,53	0,32/7,0 ‖ 0,05	3,5/33 ‖ 0,11	0,06/1,2 ‖ 0,05	1,0/13 ‖ 0,08	0,45/9,3 ‖ 0,05	0,43/1,1 ‖ 0,39
1 ЦБК	5,3/8,9 ‖ 0,60	0,16/4,6 ‖ 0,03	1,3/32 ‖ 0,04	0,08/2,1 ‖ 0,04	0,43/9,5 ‖ 0,05	0,32/6,9 ‖ 0,05	0,51/1,2 ‖ 0,43
2 ЦБК	5,6/11 ‖ 0,51	0,18/4,2 ‖ 0,04	1,3/31 ‖ 0,04	0,11/1,2 ‖ 0,09	0,43/9,1 ‖ 0,05	0,34/6,2 ‖ 0,05	0,65/1,2 ‖ 0,52

По данным табл.4 видно, что интенсивность накопления рассматриваемых тяжелых металлов горчицей сарептской из незагрязненного образца почвы (контроль) в 5-20 раз выше, чем из почвосмечей с чрезвычайно опасным уровнем загрязнения. Это объясняется работой экопротекторной функции растения в условиях полиметаллического стресса. Для всех изученных элементов коэффициент транслокации $T_F < 1$ и их распределение в органах растения происходит по акропетальному типу, что также указывает на высокую толерантность горчицы сарептской к загрязнению субстрата тяжелыми металлами [34]. При этом в корневой системе, как основной буферной зоне растений, происходит интенсивное накопление всех рассмотренных тяжелых металлов. К элементам сильного накопления в побегах можно отнести только Cd и Cr, а также частично Ni (его интенсивное накопление в побегах отмечено только в некоторых вариантах почвосмесей). Остальные металлы, накопленные в побегах горчицы сарептской, относятся к элементам среднего захвата. Наиболее эффективная транслокация из корней в надземные органы среди изученных тяжелых металлов отмечена для Zn и Cd (геохимических аналогов) [35]. При этом интенсивность аккумуляции Cd примерно на порядок выше, чем Zn.

Можно отметить тенденцию роста интенсивности накопления тяжелых металлов растениями с уменьшением дозы внесения нейтрализующего мелиоранта. Это связано с увеличением содержания биодоступных форм металлов в почвосмесях по мере роста их кислотности, а также повышением способности растений к биоаккумуляции с уменьшением pH среды [36]. Уменьшение дозы внесения нейтрализующего мелиоранта приводит к снижению продуктивности почвосмесей (табл.4), а следовательно и к уменьшению общего количества извлеченных тяжелых металлов. В случае внесения 1/16 от расчетной дозы шлака и золы ЦБК, у растений отмечается очень слабое развитие корневой системы, что препятствует созданию противоэрозионного покрова. Вероятно, внесение малых доз нейтрализующих добавок также потребует проведения более частого периодического известкования для поддержания нейтральной кислотности почвосмесей.

Заключение

На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы и наметить план дальнейших исследований в области восстановления нарушенных земель Арктики с использованием фитотехнологии.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Установлен высокий потенциал изученных отходов производства (шлака, золы ТКО и ЦБК) в сравнении с традиционным мелиорантом (известь) для нейтрализации кислых почв, загрязненных тяжелыми металлами. В результате их внесения отмечается не только изменение кислотности почв, но и улучшение физико-механических свойств и элементного состава. Вторичное загрязнение обрабатываемых почв в результате внесения отходов производства незначительно благодаря снижению подвижности тяжелых металлов из-за повышения pH. Во всех вариантах полученных почвосмесей отмечено увеличение подвижных и водорастворимых форм Cr, а также незначительный рост содержания подвижных форм Pb и Co при внесении золы ЦБК и шлака, соответственно. При этом суммарный уровень загрязнения почв снижается, а также происходит их обогащение питательными элементами Ca, Mg, K, Na, а в случае внесения золы ЦБК еще и P, N и органическим C.

• Установлено, что основным лимитирующим фактором при рекультивации исследуемого образца кислой почвы, загрязненной тяжелыми металлами, выступает ее токсичность для растений, а именно содержание подвижных и водорастворимых (биодоступных) форм металлов, снижающееся по мере роста pH почвосмеси. При этом эффективность фитоэкстракции имеет обратно-пропорциональную зависимость от pH почвосмеси. Для получения продуктивных почвосмесей, обеспечивающих нормальное развитие корневой системы растений и достижение ими генеративной стадии, с одной стороны, и способствующих эффективной фитоэкстракции, с другой, выявлены следующие диапазоны доз внесения изученных отходов производства: 1/4-1/2 от расчетной дозы шлака (16-33 г/кг); 1/8-1/4 от расчетной дозы золы ТКО (7-14 г/кг) и 1/4-1/2 от расчетной дозы золы ЦБК (20-39 г/кг).

• Наиболее сильным мелиорантом проявила себя зола ТКО. Однако ее применение в сравнении с другими изученными мелиорантами показало меньшую эффективность (см. табл.3). С одной стороны, при внесении больших доз золы ТКО происходит чрезмерное защелачивание почвы и увеличение содержания биодоступных форм хрома, входящего в состав мелиоранта, с другой, низкие дозы внесения не обеспечивают необходимого улучшения физико-механических свойств почвы и повышения ее питательности, что сказывается на продуктивности полученных почвосмесей. Для повышения продуктивности таких почвосмесей возможно дополнительное внесение органоминеральных удобрений. Шлак проявил себя как нейтрализатор пролонгированного действия, при его внесении на предварительную нейтрализацию требуется порядка 8 недель, в то время как при внесении зол ТКО и ЦБК достаточно 3-4 недель, что обусловлено различным составом и, прежде всего, дисперсностью изученных отходов.

• Горчица сарептская проявила высокую толерантность к полиметаллическому загрязнению и показала хорошую всхожесть и выживаемость растений в широких диапазонах pH почвосмесей, что подтверждает возможность ее использования для создания противоэррозионного растительного покрова на нарушенных землях. Несмотря на интенсивное накопление всех рассмотренных тяжелых металлов (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) в корнях, коэффициент их транслокации в надземные органы растения оказался невысоким, т.е. основным механизмом снижения опасности загрязненных почв в данном случае будет фитостабилизация. В сочетании с сидеративными свойствами горчицы сарептской и ее коротким вегетационным периодом это может способствовать быстрому созданию пионерного растительного покрова на загрязненных территориях, а также оздоровлению почвенной экосистемы и увеличению ее плодородия для дальнейшего восстановления естественной сукцессии.

• В задачи дальнейших исследований в области восстановления нарушенных земель Арктики с применением фитотехнологии входит также изучение индуцированной фитоэкстракции. Для этого предполагается изучение влияния внесения в загрязненные почвы гуминовых и фульвокислот, которые, с одной стороны, связывают тяжелые металлы в почве в стабильные комплексы и способствуют стабилизации кислотности почв, тем самым осуществляя биопротекторную функцию, с другой, интенсифицируют поглощение металлов растениями из загрязненной почвы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лебедев Я.О., Кобец Д.А., Мельниченко Т.Н.* Оценка геохимического состояния почв Арктической зоны (с.п. Хатанга, Красноярский край) // Вестник Евразийской науки. 2025. Т. 17. № 4. № 28NZVN425.

2. *Пономарев А.Б., Захаров А.В., Татьянников Д.А., Шаламова Е.А.* Геотехнический мониторинг в условиях городского строительства // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 5. С. 17-22.

3. *Никитин Д.А.* Биологическая активность почв и почвоподобных тел Западной части Арктической зоны Российской Федерации // Почвоведение. 2025. № 12. С. 1692-1706. DOI 10.7868/S3034561825120049

4. *Lipina S., Zaikov K., Lipina A. et al.* Roadmaps of Environmental Safety of Promising Coal Deposits in Far North Regions // International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects. 2026. Vol. 39. Iss. 3. P. 576-584. DOI: 10.5829/ije.2026.39.03c.02

5. *Соколов Ю.И.* Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2 (10). С. 18-27.

6. *Шевчук А.В., Шумихин О.В.* Эколого-экономические аспекты ликвидации накопленного экологического ущерба в Арктике // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2019. № 4. С. 95-106.

7. *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

8. *Иванова Л.А., Слуковская М.В., Красавцева Е.А.* Оценка эффективности использования осадка сточных вод для рекультивации нарушенных территорий в Кольской субарктике (на примере песчаного карьера) // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 444-452.

9. 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

10. *Пухальский Я.В., Воробьев Н.И., Лоскутов С.И. и др.* Нейросетевой когнитивный анализ аккумуляции тяжелых металлов растениями бархатцы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 515. № 2. С. 304-314. DOI: 10.31857/S2686739724040161

11. *Слуковская М.В., Кременецкая И.П., Мосендз И.А. и др.* Ремедиация антропогенно-нарушенных территорий с использованием серпентинсодержащих отходов // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 6. С. 45-51. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.PRIL.45-51

12. *Вараксин Г.С., Кузнецова Г.В., Евграфова С.Ю., Шапченкова О.А.* Опыт биологической рекультивации техногенных ландшафтов в Норильском промышленном районе // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 1039-1047.

13. *Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е.* Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375-1391. DOI: 10.7868/S0032180X16090082

14. *Коротков В.Н., Копцик Г.Н., Смирнова И.Е., Копцик С.В.* Восстановление растительности на техногенных пустошах в окрестностях Мончегорска (Мурманская область, Россия) // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2019. Т. 4 (1). 18 p. DOI: 10.21685/2500-0578-2019-1-4

15. *Naz M., Zhicong Dai, Hussain S. et al.* The soil pH and heavy metals revealed their impact on soil microbial community // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 321. № 115770. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115770

16. *Bykowa E., Banikevich T.* Relationship Between the Integral Indicator of Soil Quality and the Cadastral Value of Agricultural Lands // Land. 2025. Vol. 14. Iss. 5. № 941. DOI: 10.3390/land14050941

17. *Wenyika P., Enesi R.O., Gorim L.Yu., Dyck M.* Effects of liming on soil physical and chemical properties in Europe and North America: A review // Agrosystems, Geosciences and Environment. 2025. Vol. 8. Iss. 3. № e70175. DOI: 10.1002/agg2.70175

18. *Uwiringiyimana E., Hong-wei Lai, Ni Ni et al.* Comparative efficacy of alkaline slag, biomass ash, and biochar application for the amelioration of different acidic soils // Plant and Soil. 2024. Vol. 504. Iss. 1-2. P. 47-61. DOI: 10.1007/s11104-024-06678-8

19. *Матвеева В.А., Лукьянова А.В.* Оценка эффективности использования флюсового известняка Сокольско-Ситовского месторождения в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв // Геология и геофизика Юга России. 2023. Т. 13. № 3. С. 153-166. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012

20. *Vilasini P.P., Thangasamy L., Balu S., Achyutha Kumar Reddy M.* Utilization of pond ash and lime kiln dust for the amelioration of expansive soil subgrade // Progress in Engineering Science. 2025. Vol. 2. Iss. 3. № 100113. DOI: 10.1016/j.pes.2025.100113

21. *Ковшов С.В.* Влияние биогумуса на основе отходов птицеводства на физико-химические свойства дерново-подзолистых почв и выращиваемых растений // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 2 (56). С. 326-337. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-326-337

22. *Povarov V.G., Cheremisina O.V., Alferova D.A.* Determination of Energy Interaction Parameters for the UNIFAC Model Based on Solvent Activity Coefficients in Benzene–D2EHPA and Toluene–D2EHPA Systems // Chemistry. 2026. Vol. 8. Iss. 1. № 2. DOI: 10.3390/chemistry8010002

23. *Титова К.О., Петрушкова А.И., Юдина Н.А.* Комплексный анализ и сравнение современных технологий утилизации отходов с получением энергии в России // Учет и контроль. 2025. Т. 3. № 12. С. 155-168. DOI: 10.36871/u.i.k.2025.12.03.017

24. *Дука А.А., Пашкевич М.А., Сверчков И.П.* Влияние совместной термической утилизации углесодержащих и сельскохозяйственных отходов на плавкость золы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 9. С. 67-85. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_67

25. *Sverchkov I., Chukaeva M., Matveeva V.* Influence of preparation and combustion parameters of coal-water slurries on gas emission chemistry // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Iss. 29. P. 44042-44053. DOI: 10.1007/s11356-022-19038-9

26. *Xiaoe Yang, Ying Feng, Zhenli He, Stoffella P.J.* Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 2005. Vol. 18. Iss. 4. P. 339-353. DOI: 10.1016/j.jtemb.2005.02.007

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

27. *Espada J.J., Rodríguez R., Delgado A. et al.* Assessing Environmental Sustainability of Phytoremediation to Remove Copper from Contaminated Soils // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 6. № 2441. DOI: 10.3390/su16062441

28. *Холопцева Е.С., Казнина Н.М., Батова Ю.В., Титов А.Ф.* Физиолого-биохимические показатели растений горчицы сарептской при раздельном и одновременном действии избытка цинка и низкой температуры // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 3. С. 32-42. DOI: 10.17076/eb2079

29. *Rahman L., Whitelaw-Weckert M.A., Orchard B.* Consecutive applications of brassica green manures and seed meal enhances suppression of *Meloidogyne javanica* and increases yield of *Vitis vinifera* cv Semillon // Applied Soil Ecology. 2011. Vol. 47. Iss. 3. P. 195-203. DOI: 10.1016/j.apsoil.2010.12.006

30. *Bortoloti G.A., Baron D.* Phytoremediation of toxic heavy metals by *Brassica* plants: A biochemical and physiological approach // Environmental Advances. 2022. Vol. 8. № 100204. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100204

31. *Haribabu T.E., Latha S., Lavanya G. et al.* Phytoextraction of Heavy Metals: Assessing the Potential of Brassica juncea in Heavy Metals (Copper and Cadmium) from Contaminated Soils // Asian Journal of Chemistry. 2024. Vol. 36. №. 12. P. 2961-2966. DOI: 10.14233/ajchem.2024.32542

32. *Aryal M.* Phytoremediation strategies for mitigating environmental toxicants // Heliyon. 2024. Vol. 10. Iss. 19. № e38683. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e38683

33. *Jouichat H., Khiari L., Gallichand J., Ismail M.* Modeling temporal variation of soil acidity after the application of liming materials // Soil and Tillage Research. 2024. Vol. 240. № 106050. DOI: 10.1016/j.still.2024.106050

34. *Чукаева М.А., Матвеева В.А.* Заявка на изобретение № 2026105903 РФ. Состав для рекультивации кислых почв, загрязненных тяжелыми металлами. Заявл. 05.03.2026.

35. *Page V., Feller U.* Heavy Metals in Crop Plants: Transport and Redistribution Processes on the Whole Plant Level // Agronomy. 2015. Vol. 5. Iss. 3. P. 447-463. DOI: 10.3390/agronomy5030447

36. *Xinyang Li, Jiawen Zhou, Tong Zhou et al.* Potential mobilization of cadmium and zinc in soils spiked with smithsonite and sphalerite under different water management regimes // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 324. № 116336. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116336

***Авторы*: Мария Алексеевна Чукаева,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *shellx@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3643-6757*, **Ян Викторович Пухальский,** *научный сотрудник НОЦ инновационного растениеводства «Зимний сад»* (*Ленинградский государственный университет им. А.С.Пушкина, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-5233-3497*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0