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*

Применение материала из бедных вермикулит-серпентиновых руд для рекультивации городских почв и агропочв в Арктической зоне России

И.П.Кременецкая[1], А.Б.Хвостова[2], Н.В.Салтан[3], С.В.Дрогобужская[1], М.В.Слуковская[1,4], Т.К.Иванова[1,4]✉, А.Г.Петрова[1,4], А.И.Новиков[1]

[1] *Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

[2] *Полярная опытная станция, филиал Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И.Вавилова, Апатиты, Россия*

[3] *Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А.Аврорина КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

[4] *Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

Как цитировать эту статью: Кременецкая И.П., Хвостова А.Б., Салтан Н.В., Дрогобужская С.В., Слуковская М.В., Иванова Т.К., Петрова А.Г., Новиков А.И. Применение материала из бедных вермикулит-серпентиновых руд для рекультивации городских почв и агропочв в Арктической зоне России // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 95-106. EDN UCVBUT

Аннотация

Проблема утилизации отходов горно-добывающей промышленности является актуальной для Арктической зоны России. Значительные объемы вскрышных пород Ковдорского месторождения флогопита, представленные бедными вермикулит-сунгулитовыми рудами, требуют разработки экологически безопасных способов их вовлечения в хозяйственный оборот. Целью исследования является оценка потенциала вермикулит-серпентинового концентрата (ВСК), полученного из вскрышных пород, для рекультивации антропогенно нарушенных почв. Перспективность применения ВСК для улучшения свойств таких почв обусловлена его благоприятным минеральным составом (серпентин 30-35, вермикулит 28-31 % по массе). В лабораторных экспериментах были подготовлены смеси ВСК с агропочвой (10-60 % по массе) и образцами городских почв трех городов Мурманской обл. (Апатиты, Кировск и Мончегорск) (20 % по массе), различающихся по уровню техногенной нагрузки. Изучено содержание в них химических элементов двух подвижных фракций, проведено фитотестирование с бархатцами отклоненными (*Tagetes patula*). ВСК имеет щелочную реакцию (pH_{H_2O} 8,9), благодаря наличию в составе минералов, способных концентрировать Ni, валовое содержание данного компонента составляет 730 мг/кг. Установлено, что внесение ВСК повышает щелочность почвосмесей и содержание подвижных форм Ca и Mg. В слабозагрязненной агропочве содержание подвижного никеля при добавлении 10-50 % ВСК увеличивается от 1,5 до 2,5 мг/кг, при содержании более 60 % – снижается ниже фоновых значений. Фитотестирование показало, что в диапазоне 10-60 % ВСК масса корней увеличилась от 0,09-0,1 до 0,13-0,18 г/растение, признаки фитотоксичности отсутствовали. Для почв Мончегорска, характеризующихся высоким уровнем техногенного загрязнения никелем и медью, внесение концентрата, напротив, привело к устойчивому снижению содержания подвижных форм обоих металлов. Вермикулит-серпентиновый концентрат может быть рекомендован в качестве мелиоранта для рекультивации почв, бедных макроэлементами и загрязненных тяжелыми металлами.

Ключевые слова

вермикулит; серпентин; никель; рекультивация почв; городские почвы; фитотестирование; Мурманская область

Финансирование

Получение ВСК и химические исследования почв выполнены в рамках темы НИР 226021129882-5; исследование биологического отклика и подготовка публикации выполнены в рамках проекта РНФ 24-77-10055.

Поступила: 02.04.2026 ***Принята: 22.07.2026*** ***Онлайн: 18.09.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Проблема утилизации отходов горно-добывающей промышленности является актуальной для Арктической зоны Российской Федерации. На территории Мурманской обл. в районе Ковдора сосредоточены значительные объемы бедных вермикулит-сунгулитовых руд, заскладированных при разработке флогопитового карьера предприятия ООО «Ковдорслюда» [1]. Склад

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© И.П.Кременецкая, А.Б.Хвостова, Н.В.Салтан, С.В.Дрогобужская, М.В.Слуковская, Т.К.Иванова, А.Г.Петрова, А.И.Новиков, 2026

вермикулит-сунгулитовых руд занимает площадь 74200 м^2, количество такой рудной массы составляет около 400 тыс. т. В настоящее время как бедные вермикулит-сунгулитовые руды, так и продукты их обогащения в промышленных масштабах не используются.

Сунгулит – устоявшееся название серпентинита, образовавшегося в результате процессов выветривания вермикулита, в минеральном составе преобладает серпентиновый минерал лизардит. Характерной особенностью бедных руд является наличие сростков вермикулита с сунгулитом, что существенно снижает эффективность традиционных методов обогащения [2, 3]. В то же время минеральный состав рассматриваемого сырья определяет его потенциальную пригодность для использования в качестве агроруд при конструировании почвенных субстратов различного назначения. Вермикулит-серпентиновые материалы могут быть востребованы для регулирования кислотно-щелочных и гидрофизических свойств, а также иммобилизации тяжелых металлов в условиях техногенно нарушенных территорий [4, 5].

Серпентиновые минералы широко распространены в земной коре, образуя в отдельных регионах серпентиновые провинции со специфической растительностью [6, 7]. Подобно глинистым минералам серпентиниты могут рассматриваться как экологически безопасные материалы [8]. Серпентиновые минералы относятся к гидросиликатам магния со стехиометрической формулой $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ [9, 10]. Комбинация кремнекислородных тетраэдрических и магнийсодержащих октаэдрических слоев обуславливает слоистую структуру, а несовпадение геометрии слоев – существование нескольких полиморфных модификаций – лизардита, хризотила и антигорита. Химический состав серпентинов изменяется вследствие изоморфных замещений в октаэдрическом и тетраэдрическом слоях: в позиции M (октаэдр) помимо Mg^{2+} могут входить Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+}, Ni^{2+}, Mn^{2+} и Zn^{2+}, а в позиции T (тетраэдр) – Si^{4+}, Al^{3+}, Fe^{3+}, обобщенная формула – $Mg_{3-x}(M)_xSi_{2-y}(T)_y\times$ $\times O_5(OH)_4$ [11-13]. Благодаря развитой слоистой структуре, высокой удельной поверхности и способности к ионному обмену серпентины проявляют сорбционные свойства по отношению к тяжелым металлам, что делает их перспективными природными материалами для применения в экологической и технологической сферах, включая очистку сточных вод и рекультивацию загрязненных территорий [14, 15]. Сорбция металлов серпентиновыми минералами может происходить путем адсорбции на поверхности [16], включения в структуру минерала [17] и осаждения малорастворимых соединений в щелочной среде [18].

Вермикулит относится к группе слоистых алюмосиликатов типа гидрослюд и характеризуется слоистой кристаллической структурой, сформированной тетраэдрическими кремнекислородными и октаэдрическими магний-железистыми слоями, между которыми располагаются обменные катионы и молекулы воды [19]. Приближенная химическая формула вермикулита может быть представлена как (Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+})[(Si A1)$_4$,O_{10}] [OH]$_2\cdot 4H_2O$, где межслоевые катионы и вода определяют способность минерала к набуханию и ионному обмену [20-22]. В результате термической обработки происходит резкое увеличение межслоевого расстояния и формирование высокопористой структуры с развитой удельной поверхностью, что значительно повышает адсорбционные свойства минерала [23]. Благодаря таким особенностям вермикулит обладает высокой катионообменной емкостью и способен эффективно сорбировать ионы тяжелых и редкоземельных металлов, а также применяется для ликвидации нефтяных загрязнений. Процесс сорбции определяется как ионным обменом в межслоевых позициях, так и поверхностной адсорбцией на гидроксильных и силикатных группах [24-26].

Минералого-технологические свойства и практический опыт использования вермикулита и серпентинов при рекультивации позволяют рассматривать возможность использования ковдорского сырья в качестве агроруды. Расширение области применения бедных вермикулит-сунгулитовых руд для их утилизации предусматривает изучение влияния материалов, содержащих вермикулит и сунгулит, на фитотоксичность и концентрацию элементов питания и потенциально токсичных металлов в почвенных растворах. Поскольку серпентиновые минералы и вермикулит являются природными концентраторами никеля, поведению данного металла уделено особое внимание.

Целью исследования является оценка потенциала вермикулит-серпентинового концентрата (ВСК), полученного из вскрышных пород, для рекультивации антропогенно нарушенных почв.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Задачи исследования: рассмотреть влияние различных доз ВСК (10-60 % по массе) на физико-химические свойства, содержание подвижных форм макроэлементов (Ca, Mg, Si, P) и тяжелых металлов (Ni, Cu) при внесении в агропочву и городские почвы с различным уровнем техногенной нагрузки; выявить биологический отклик тест-растения (*Tagetes patula*) и микробного сообщества (целлюлозолитическая активность) на внесение ВСК в почву.

Материалы и методы исследования

ВСК был получен путем отсева из бедной вермикулит-сунгулитовой руды фракции более 20 мм, которую измельчали и подвергали классификации с получением фракции менее 0,5 мм. Содержание серпентина в ВСК составляет 30-35 % по массе, вермикулита – 28-31 % по массе, остальное – преимущественно пироксеновые минералы, а также доломит, кальцит, апатит. ВСК является щелочным материалом, pH_{H_2O} 8,9, pH_{KCl} 7,8.

В соответствии с минеральным составом в валовом химическом составе ВСК преобладают Mg и Si (табл.1), присутствуют также Fe – 10,7, Al – 2,5, Ca – 2,1, K и P – менее 1 % по массе. Содержание металлов: Cu – 30, Zn – 140, Ni – 730 мг/кг.

Таблица 1

Химический состав ВСК

Компоненты	Валовое содержание	Потенциально подвижная фракция (0,2 н HCl)	Актуально подвижная фракция (0,01 н HCl)
Si, % по массе	21,5	0,58	0,055
Mg, % по массе	18,9	1,59	0,12
Ca, % по массе	2,1	2,04	0,50
K, % по массе	0,1	0,1	0,1
P, % по массе	0,5	0,35	0,0045
Cu, мг/кг	30	12	0
Ni, мг/кг	730	81	2
Zn, мг/кг	140	18	2

Агропочва, отобранная на территории сельскохозяйственного предприятия вблизи Апатитов, является нейтральной, значения pH_{H_2O} 6,9, pH_{KCl} 6,3. Образцы городских почв отобраны на территории населенных пунктов Мурманской обл. с различной антропогенной нагрузкой – в Кировске (образцы серии К), Апатитах (А) и Мончегорске (М). Отбор почв на глубине 0-15 см производился в двух зонах землепользования: рекреационной (парки и скверы), образцы А1, А7, М13, М15; общественной (разделительные полосы и газоны по обочинам дорог), образцы А3, А5, К9, К11, М17, М19. Общая характеристика почвенных образцов, а также анализ взаимосвязи форм углерода, азота и содержания металлов приведены в работе [27].

Схема эксперимента. Влияние ВСК на свойства агропочвы. Готовили смеси агропочвы с ВСК с содержанием концентрата от 10 до 60 % по массе, в качестве контроля использовались чистая агропочва (вариант 0 %) и чистый ВСК (вариант 100 %). Эксперименты по фитотестированию выполнены в трехкратной повторности. На дно сосуда укладывали хлопчатобумажную ткань, почвосмеси увлажняли, выдерживали в течение 14 дней, затем высаживали рассаду бархатцев. Рассада бархатцев отклоненных (*Tagetes patula*), сорт «Красный король», получена с применением термовермикулита из вермикулитового концентрата (Ковдор, Мурманская обл.). Обжиг вермикулита фракции 0,45-2 мм выполнен на электрической модульно-спусковой печи конструкции А.И.Нижегородова [28].

Выбор бархатцев отклоненных обоснован их высокой толерантностью к загрязненным городским субстратам и доказанной способностью данного растения аккумулировать тяжелые металлы (Zn, Cu, Pb) [29, 30]. Адаптационный потенциал к основным стрессовым факторам (недостаток влаги и света, низкие температуры, высокая концентрация тяжелых металлов) наряду с быстрым развитием мощной корневой системы делает бархатцы отклоненные идеальными кандидатами для восстановления загрязненных земель, так как корни осуществляют системный вынос токсикантов [31]. Кроме того, *Tagetes patula* широко применяются для озеленения северных городов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В условиях Арктической зоны, в частности в Мурманской обл., использование рассады является сложившейся практикой, обусловленной климатическими особенностями региона, прежде всего коротким вегетационным периодом. В теплицах для получения рассады используют в том числе вспученный вермикулит. Растения выращивали в течение 28 дней, в конце опыта определяли морфологические и биометрические показатели (количество листьев и стеблей, воздушно-сухую биомассу корневых систем, листьев, стеблей, бутонов и цветов). Далее почвосмеси высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с размером ячеек 2 мм и анализировали.

Влияние ВСК на свойства городских почв различного состава. Готовили смеси ВСК с образцами городских почв при содержании ВСК 20 % по массе, проводили фитотестирование почвосмесей аналогично эксперименту с агропочвой.

Методы исследования. Для измерения pH водных и солевых суспензий (раствор KCl с концентрацией 1 моль/л) использовали анализатор жидкости pH-метр-иономер «Эксперт-001» с электродом стеклянным лабораторным ЭСЛ-63-07СР и электродом вспомогательным лабораторным хлорсеребряным ЭВЛ-1М3.1. Водную вытяжку для измерения pH готовили при соотношении твердой и жидкой фаз (Т:Ж) 1:5, перемешивании и отстаивании в течение 3 и 5 мин в соответствии с ГОСТ 26423-85[1]. Солевая (KCl) вытяжка для измерения pH готовилась в соотношении Т:Ж 1:25, перемешивалась на лабораторном шейкере в течение 1 ч в соответствии с ГОСТ 26483-85[2].

Валовой состав почвенных образцов определяли на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN-9000 DRC-e (Perkin Elmer, США) после автоклавного кислотного разложения. Использовали концентрированные кислоты HF, HNO_3, HCl квалификации «особо чистые» в соотношении (2:2:1). Вскрытие образцов массой 1 г проводили в автоклавах DAK-100 из материала PTFM объемом 100 мл, выдерживающих максимальное давление 100 бар при температуре до 195 °C в микроволновой системе MW 4 (Berghoff, Германия). Для настройки прибора применяли многоэлементный стандартный раствор Multi-element ICP-MS Calibration STD – № 1 (Perkin Elmer, США), для градуировки прибора – многоэлементные стандартные растворы IV-STOK-21, IV-STOK-28 и IV-STOK-29 (Inorganic Ventures, США) с массовой концентрацией определяемых элементов 10 мг/дм^3 и погрешностью, не превышающей 0,5 % при P = 0,95. В качестве фонового раствора для разбавления образцов использовали 2 %-ный раствор HNO_3. Правильность проводимых измерений оценивали с помощью анализа стандартных образцов: ГСО 902-76 (СП-2 – московская дерново-подзолистая почва), ГСО 903-76 (СП-3 – прикаспийская светло-каштановая почва), NIST SRM-SOIL-A (High-purity standards, USA).

Концентрации подвижных компонентов в ВСК и почвенных образцах определяли методом параллельного выщелачивания растворами HCl с концентрацией 0,01 моль/л (актуально подвижная фракция, С1) и 0,2 моль/л (потенциально подвижная фракция, С2). Образцы почвы (10 г) заливали раствором кислоты (100 мл) и оставляли на 24 ч; затем раствор отделяли от твердой фазы центрифугированием в течение 30 мин при 4000 об/мин. Полученный раствор фильтровали через мембранный фильтр МФАС-ОС-2 («Владипор», Владимир) с размером пор 0,45 мкм и анализировали методом атомно-эмиссионной спектрометрии на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония).

Целлюлозолитическую активность почвы (ЦЛА) определяли аппликационным методом с использованием хлопчатобумажной ткани [32]. По завершении эксперимента образцы извлекали, очищали и высушивали. Количественную оценку степени деструкции целлюлозного материала проводили на основе анализа цифровых изображений остаточных фрагментов ткани. Расчет площади образцов после опыта выполняли в программе ImageJ.

Насыпную плотность материалов определяли согласно ГОСТ 19440-94[3], максимальную влагоудерживающую способность – по ГОСТ 32632-2014[4]. Содержание углерода и азота устанавливали на анализаторе EuroVector EA 3000.

[1] ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки.

[2] ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО.

[3] ГОСТ 19440-94. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Часть 1. Метод с использованием воронки. Часть 2. Метод волюмометра Скотта.

[4] ГОСТ 32632-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Аммонийный и нитратный азот определяли с применением ион-селективных электродов. Аммонийный азот экстрагировали дистиллированной водой (50 мл на 20 г почвосмеси) в течение 5 мин, полученную суспензию центрифугировали. Нитратный азот экстрагировали раствором алюмокалиевых квасцов с концентрацией 1 % при том же соотношении Т:Ж. Суспензии встряхивали в течение 30 мин на перемешивающем устройстве ПЭ-6410 М и центрифугировали. Центрифугирование суспензий для отделения жидкой фазы от твердой производили на центрифуге лабораторной DM0636 (DLAB Scientific Co., Ltd, Beijing, Китай, 2022) в течение 30 мин при скорости вращения 4000 об/мин. Надосадочный раствор дополнительно пропускали через мембранный фильтр МФАС-ОС-2 (размер пор 0,45 мкм, производство «Владипор») при помощи вакуумного насоса (НВМ-5). Полученный раствор анализировали с помощью анализатора жидкости «Эксперт-001».

Результаты обрабатывали методами математической статистики с применением пакета программ MS Excel 2016, расчеты наименьшей существенной разности для 5 %-ного уровня значимости ($НСР_{0,5}$) выполняли на сайте simple-statistics.ru.

Обсуждение результатов

Влияние внесения ВСК на свойства агропочвы. С увеличением содержания ВСК закономерно возрастает щелочность экспериментальных почвосмесей (рис.1). Коэффициенты линейной корреляции показателей почвосмесей с содержанием в них ВСК: pH_{H_2O} 0,93, pH_{KCl} 0,77, Ca 0,72, Mg 0,15, P –0,90, Si –0,77, Ni –0,54. Уменьшение коэффициента корреляции между содержанием ВСК и pH_{KCl} свидетельствует о протекании реакций обмена с компонентами почвосмесей. При больших содержаниях ВСК в диапазоне 40-100 % по массе pH водной суспензии превышает значение 8, в то время как в солевой суспензии реакция среды изменяется незначительно – в пределах 7,7-7,9.

Концентрация Ni в агропочве в подвижной фракции составляет 1,5 мг/кг, в диапазоне содержания ВСК 10-50 % переход Ni в подвижную фракцию приводит к увеличению данного показателя до 2,5 мг/кг. При более высоких содержаниях ВСК происходит снижение концентрации Ni в подвижной фракции до значений меньше фонового (1,5 мг/кг). Такое поведение Ni можно объяснить вторичными реакциями образования магний-никелевых силикатов в щелочной среде при pH более 8. О протекании таких реакций свидетельствует также экстремальная зависимость подвижного Mg от pH с максимумом при pH 8 (рис.2, *а*).

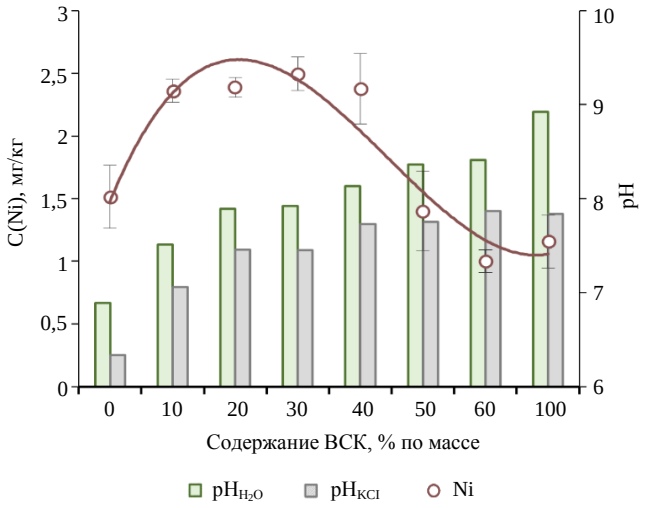


Рис.1. Влияние состава почвосмесей на pH и концентрацию Ni в подвижной фракции

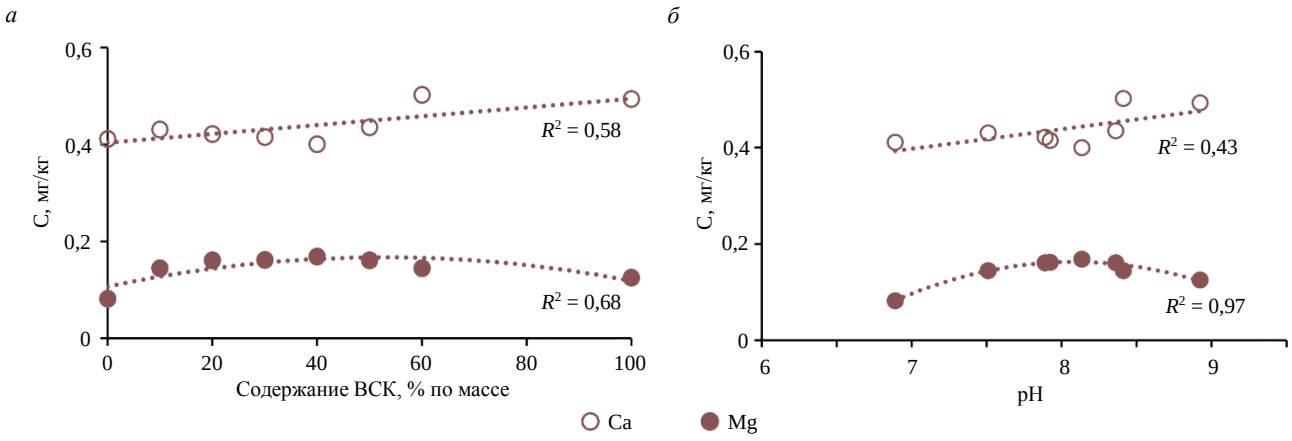


Рис.2. Зависимости концентраций подвижных форм магния и кальция от количества ВСК (*а*) и pH (*б*) почвосмесей

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© И.П.Кременецкая, А.Б.Хвостова, Н.В.Салтан, С.В.Дрогобужская, М.В.Слуковская, Т.К.Иванова, А.Г.Петрова, А.И.Новиков, 2026

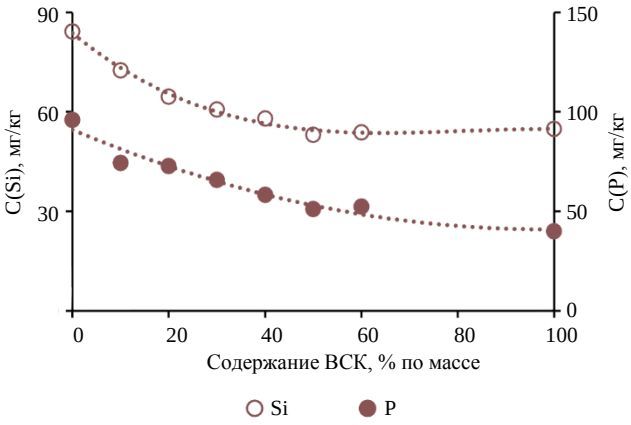


Рис.3. Зависимости концентрации подвижных форм кремния и фосфора от количества ВКС в почвосмесях

В группе химических компонентов подвижный Ca характеризуется наиболее высоким коэффициентом линейной корреляции с содержанием ВСК, между показателями наблюдается линейная зависимость с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0{,}58$ (рис.2, *а*). Для Mg коэффициент существенно ниже, и его значение (0,15) свидетельствует об отсутствии линейной зависимости. Влияние содержания ВСК на концентрацию подвижного Mg аппроксимируется экстремальной зависимостью (рис.2, *а*). Об активном участии компонентов ВСК в кислотно-щелочных реакциях свидетельствуют аналогичная взаимосвязь между pH_{H_2O} и концентрацией Ca и Mg в подвижной фракции (рис.2, *б*).

В агропочве концентрация подвижных Si и P больше, чем в ВСК, их переход в растворимую фракцию синхронно снижается по мере увеличения содержания ВСК в почвосмесях (рис.3). Уровень подвижного кремния стабилизируется в диапазоне содержания ВСК 50-100 % по массе.

Характеристика городских почв. В зависимости от локализации городские почвы существенно различаются по таким характеристикам, как насыпная плотность и полевая влажность, валовое содержание углерода, азота, содержание подвижных форм азота (табл.2).

Таблица 2

Физико-химические свойства городских почв

Характеристики	Образцы									
	A1	A3	A5	A7	K9	K11	M13	M15	M17	M19
Насыпная плотность, кг/дм^3	0,81	0,63	0,61	0,94	1,07	1,06	0,96	0,23	1,01	0,64
Полевая влажность, %	76	96	111	65	45	49	34	280	51	64
C, % по массе	4,63	8,35	8,92	2,90	3,36	4,28	1,26	27,86	3,54	4,64
N, % по массе	0,25	0,26	0,49	0,17	0,23	0,23	0,03	1,20	0,20	0,25
NH_4, мг/кг	11	1	4	3	9	2	3	15	2	10
NO_3, мг/кг	24	22	82	35	111	18	59	79	253	120
pH_{H_2O}	6,57	6,23	5,92	6,85	7,06	6,68	6,65	5,07	6,78	6,75
pH_{KCl}	4,89	4,60	4,49	5,69	6,58	5,27	5,55	4,00	5,94	5,86

Насыпная плотность почв изменяется от 0,23 кг/дм^3 в парковой зоне с высоким содержанием органического вещества (образец M15) до 1,07 кг/дм^3 на газоне возле дороги преимущественно минерального состава (K9). Полевая влажность также зависит от соотношения органического и минерального компонентов и изменяется в диапазоне 45-280 %. Содержание углерода и азота демонстрирует схожую неоднородность: максимальные концентрации зафиксированы в образце M15 (27,86 % по массе C и 1,20 % по массе N), что указывает на наличие органического вещества.

Содержание аммонийной (NH_4^+) и нитратной (NO_3^-) форм азота также характеризуется высокой вариабельностью значений. Наибольшее содержание нитратного азота обнаружено в образце M17 (253 мг/кг), наименьшее – в образце K11 (18 мг/кг). Кислотность водных почвенных суспензий соответствует слабокислым и близких к нейтральным условиям. В растворе KCl у исследуемых образцов отмечается уменьшение значения pH в результате ионного обмена калия на катионы H_3O^+ почвенного поглощающего комплекса [33].

Влияние внесения ВСК на содержание подвижных форм металлов в смесях с городскими почвами. Почвы Мончегорска характеризуются повышенными концентрациями Ni и Cu, тогда как в Апатитах и Кировске их содержание существенно ниже. Концентрация актуально подвижной (C1) формы Ni в почвах Мончегорска достигает 180 мг/кг (M15), Cu – 110 мг/кг (M19), что значительно

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

превышает фоновые значения и указывает на высокую степень техногенного загрязнения. В одном из образцов из Апатитов содержание C1(Cu) достигает 320 мг/кг, в Кировске почвы металлами не загрязнены, концентрации обеих форм составляют 1-5 мг/кг.

Использование фоновых значений содержания тяжелых металлов вместо предельно допустимых концентраций (ПДК) для оценки степени загрязнения почв обусловлено необходимостью учета региональных геохимических особенностей исследуемой территории. ПДК является санитарно-гигиеническим нормативом, единым для всей страны, и не учитывают природные аномалии. Сравнение с региональным фоном позволяет оценить именно антропогенную нагрузку на почву, исключив естественную вариабельность ее химического состава. Данный подход соответствует стандартным методикам геоэкологического мониторинга[5].

Внесение в почву ВСК снижает содержание обеих форм Cu во всех образцах из Апатитов и Мончегорска (рис.4, *а*, *б*). Для Ni наблюдается как увеличение, так и уменьшение концентраций в опытной серии по сравнению с контрольной (рис.4, *в*, *г*). При C1(Ni) в исходной почве до 10 мг/кг (и C2(Ni) < 100 мг/кг) добавление ВСК приводит к увеличению содержания форм металла в почвосмесях. Для высокозагрязненных почв (C1 > 10 мг/кг, C2 > 400 мг/кг) концентрации подвижных форм Ni снижаются. В интервале C2(Ni) 100-400 мг/кг достоверного изменения C2 не происходит.

Как известно, токсичность многокомпонентных растворов зависит не только от концентрации экотоксикантов, но и от содержания макроэлементов, которые препятствуют проникновению металлов в клеточные структуры биологических объектов [34].

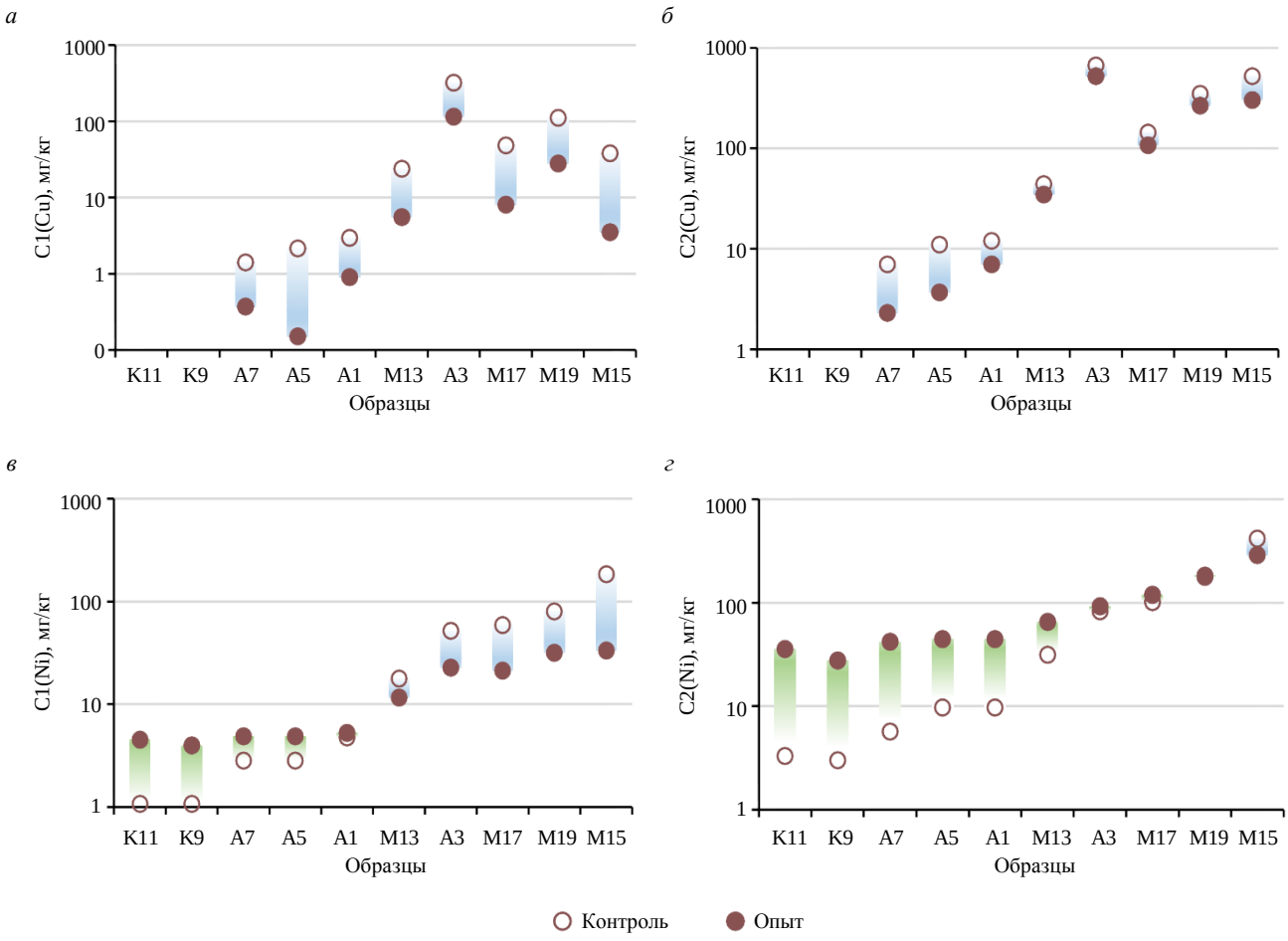


Рис.4. Содержание в почвенных образцах Cu (*а*, *б*) и Ni (*в*, *г*)
в актуально (C1) и потенциально подвижной (C2) формах в контрольной и опытной сериях

[5] РД 52.18.885-2019. Руководящий документ. Определение значений региональных фоновых концентраций органических загрязняющих веществ в почвах (введен в действие Приказом Росгидромета от 30.12.2019 № 844).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 95-106
© И.П.Кременецкая, А.Б.Хвостова, Н.В.Салтан, С.В.Дрогобужская, М.В.Слуковская, Т.К.Иванова, А.Г.Петрова, А.И.Новиков, 2026

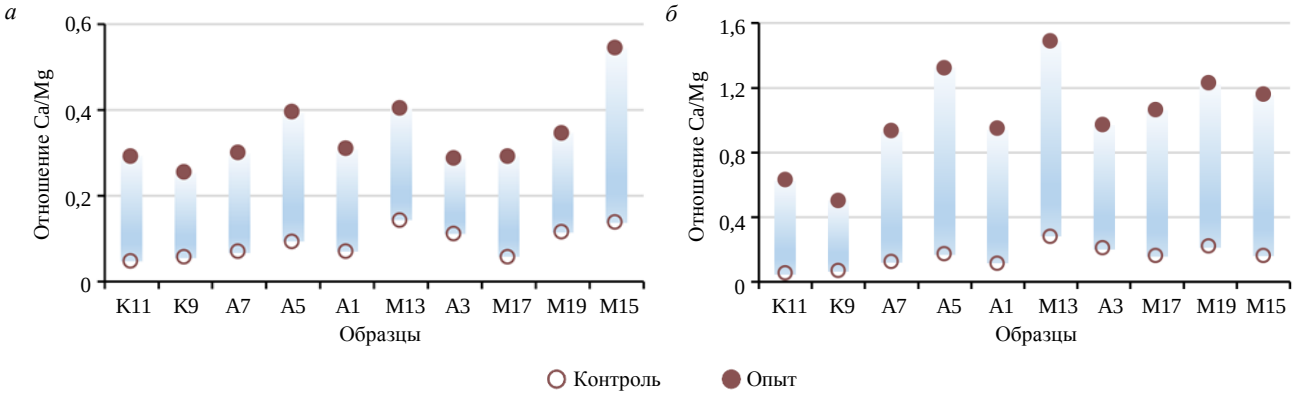


Рис.5. Отношение актуально подвижной (*а*) и потенциально подвижных (*б*) форм Ca к Mg и при внесении ВСК в почвы различного состава

Влияние внесения ВСК на содержание подвижных форм макроэлементов в городские почвы. Содержание актуально подвижной формы Mg статистически достоверно увеличивается во всех вариантах эксперимента (рис.5, табл.3). В исходных почвах C1(Mg) составляет 0,14-0,69 г/кг, после внесения ВСК достигает значений 0,9-1,9 г/кг. Для Ca тот же показатель изменяется в меньшей степени и составляет величину C1(Ca) в контроле 1,33-5,03 г/кг, в опыте 2,58-3,56 г/кг. Более существенные изменения наблюдаются для потенциально подвижной (C2) формы макроэлементов, содержание которой увеличивается на порядок для Mg и в 2-3 раза для Ca. Концентрация Ca в обеих формах во всех вариантах превышает концентрацию Mg, что для растений является благоприятным фактором (рис.5).

Таблица 3

Содержание актуально и потенциально подвижных форм Mg и Ca при внесении ВСК в почвы различного состава

Компонент	Форма компонента	Показатель	Образцы									
			K11	K9	A7	A5	A1	M13	A3	M17	M19	M15
Mg	C1	Контроль	0,14	0,22	0,20	0,20	0,19	0,19	0,22	0,20	0,31	0,69
		Опыт	0,90	0,90	1,00	1,26	1,01	1,04	0,88	1,00	1,00	1,90
		$НСР_{0,5}$	0,15	0,03	0,05	0,15	0,06	0,10	0,10	0,16	0,07	0,26
	C2	Контроль	0,27	0,34	0,43	0,45	0,42	0,43	0,69	0,63	0,79	1,16
		Опыт	6,15	4,63	7,20	8,61	7,30	7,60	6,75	8,78	8,93	13,81
		$НСР_{0,5}$	0,45	0,93	0,64	1,09	0,92	1,25	0,67	0,30	0,40	1,58
Ca	C1	Контроль	2,98	4,02	2,98	2,13	2,73	1,33	1,98	3,45	2,72	5,03
		Опыт	3,08	3,56	3,36	3,21	3,29	2,58	3,08	3,43	2,89	3,50
		$НСР_{0,5}$	0,60	0,50	0,39	0,52	0,29	0,33	0,32	0,31	0,29	0,22
	C2	Контроль	5,93	5,59	3,71	2,73	3,69	1,54	3,44	4,09	3,73	7,29
		Опыт	9,84	9,24	7,76	6,51	7,76	5,11	6,96	8,28	7,31	11,96
		$НСР_{0,5}$	1,16	1,23	0,72	0,37	0,36	1,02	0,51	0,63	1,22	2,07

Согласно классификации [35], высокой степени обеспеченности почвы кремнием соответствует содержание актуально подвижной формы > 0,04 г/кг, потенциально подвижной > 1 г/кг. Для почв Мончегорска данные показатели ниже, они характеризуются средним уровнем обеспеченности кремнием, наблюдается увеличение содержания кислоторастворимых форм кремния при внесении ВСК, в остальных вариантах либо происходит снижение, либо концентрация кремния не изменяется (рис.6, *а*, *б*).

Аналогичные процессы стабилизации содержания компонента наблюдаются и для фосфора (рис.6, *в*, *г*). При содержании P в потенциально подвижной фракции (в вытяжке по Кирсанову) C2 < 1 г/кг после внесения ВСК наблюдается незначительное увеличение, а при больших значениях – снижение данного показателя. Что касается актуально подвижной формы, то ее концентрация во всех вариантах снижается. Данный эффект согласуется с хорошо изученными свойствами силикатных минералов (в том числе вермикулита и серпентина), которые способны удерживать фосфаты за счет сорбции на поверхности, формирования малорастворимых соединений и изменения кислотно-щелочного и ионного баланса почвы [36-38].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© И.П.Кременецкая, А.Б.Хвостова, Н.В.Салтан, С.В.Дрогобужская, М.В.Слуковская, Т.К.Иванова, А.Г.Петрова, А.И.Новиков, 2026

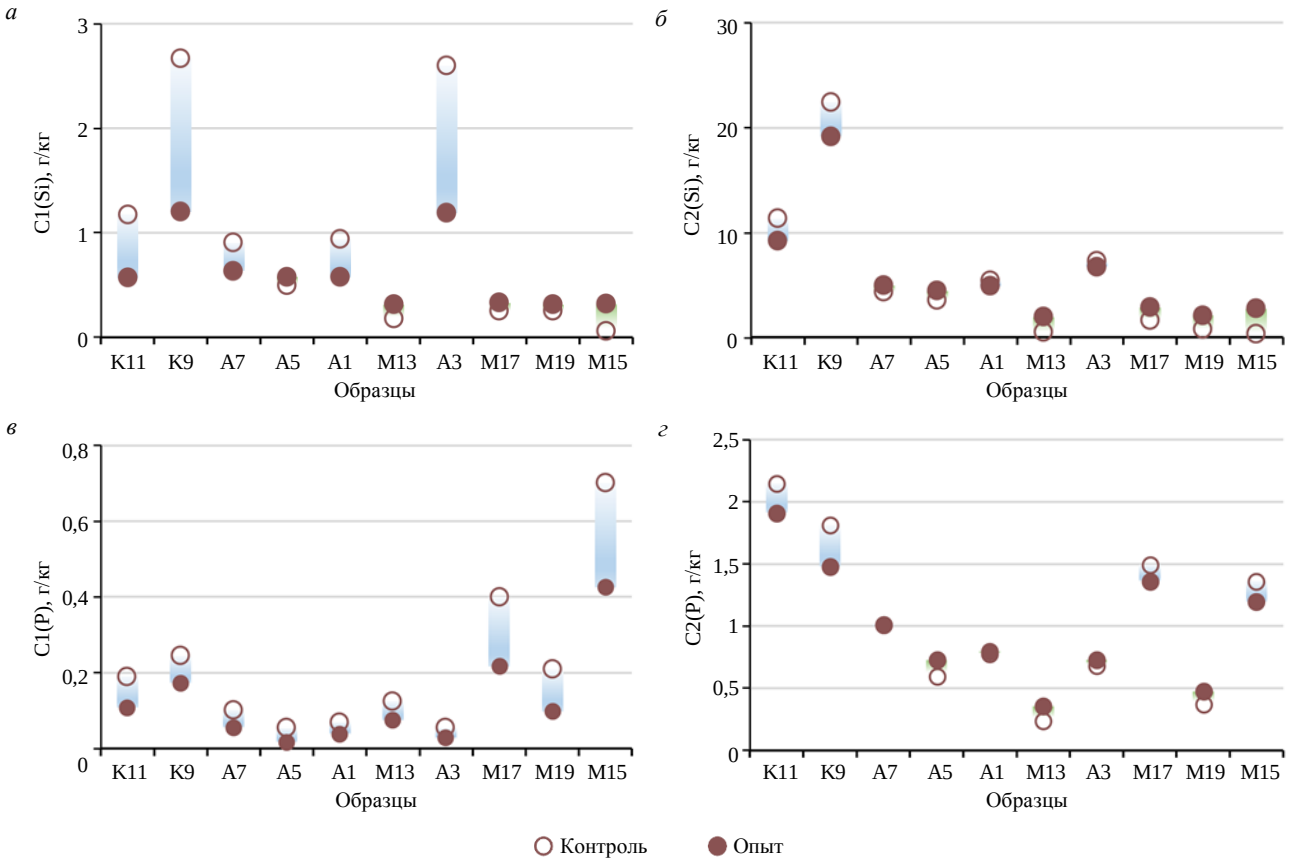


Рис.6. Содержание кислоторастворимых форм кремния и фосфора смесей ВСК с различными почвами

Фитотестирование смесей ВСК с агропочвой и городскими почвами. В почвосмесях с агропочвой при увеличении содержания ВСК наблюдается линейное уменьшение ЦЛА от высокого значения показателя для агропочвы (0,95) к ее отсутствию в ВСК (рис.7, *а*). Масса подземной части (ПЧ) растения в крайних точках экспериментальной зависимости практически не различается и составляет 0,09-0,1 г/растение, но при содержании ВКС 10-60 % по массе наблюдается увеличение до 0,13-0,18 г/растение. Наименьшее значение биомассы наземной части (НЧ) зафиксировано для опыта с 100 % ВСК (1 г/растение), в диапазоне 0-50 % по массе ВСК масса НЧ меняется незначительно (5-5,5 г/растение) и уменьшается при содержании ВСК 60 % по массе до 3,8 г/растение. Суммарная биомасса и количество листьев растений статистически значимо ($p < 0,05$) отличались от остальных вариантов только при выращивании растений на чистом ВСК (рис.7, *б*).

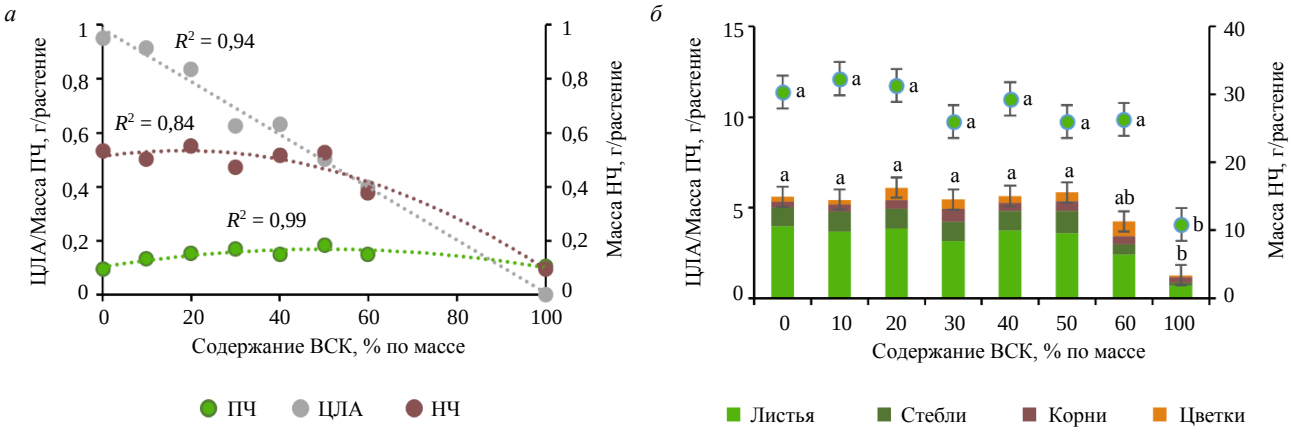


Рис.7. Влияние внесения ВСК в агропочву на целлюлозолитическую активность (*а*) и биометрические показатели тест-растения (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© И.П.Кременецкая, А.Б.Хвостова, Н.В.Салтан, С.В.Дрогобужская, М.В.Слуковская, Т.К.Иванова, А.Г.Петрова, А.И.Новиков, 2026

Количество листьев немного снижается (от 30 до 26) в диапазоне 0-60 % по массе ВСК и резко уменьшается до 10 листьев в опыте со 100 % по массе ВСК (рис.7, *б*). Подобный эффект отмечен и для количества стеблей, при этом он был менее выраженным. Несмотря на существенное снижение питательного статуса почвосмесей, что отражается на ЦЛА, в пределах содержания ВСК 0-50 % по массе вес наземной части растений практически не изменяется, а подземной – увеличивается.

Увеличение массы корневой системы бархатцев при 100 % ВСК по сравнению с исходной агропочвой является адаптивной реакцией на субстрат с высоким содержанием актуально и потенциально подвижных форм металлов при условии их низкой доступности [39]. Во всех опытных вариантах и в контрольном (100 % ВСК) сохраняется высокое содержание подвижных форм кальция и магния. Низкое содержание доступных форм никеля и высокое содержание макроэлементов создают оптимальные условия для развития корневой системы, что подтверждается результатами корневых систем в вариантах с содержанием ВСК 60-100 %. Использование высоких доз концентрата не оказывает токсичного воздействия на развитие бархатцев, что важно при использовании ВСК в качестве пролонгированного источника Ca и Mg для растений при озеленении городских территорий.

Результаты краткосрочного фитотестирования смесей ВСК с городскими почвами с применением бархатцев не выявили различий между опытными вариантами, чем подтвердились описанные результаты. Внесение ВСК в городскую почву, загрязненную никелем, оказывает комплексное положительное воздействие, которое позволяет в полной мере реализоваться адаптационным механизмам бархатцев. С одной стороны, сорбционные свойства материала и его способность повышать pH почвы снижают доступность потенциально токсичных металлов. Это важно, поскольку бархатцы в фазе активного роста чувствительны к высоким концентрациям доступного Ni [34]. С другой стороны, обогащение почвы кальцием и магнием улучшает минеральное питание, что особенно актуально на фоне способности никеля ингибировать транспорт этих элементов. В результате снижения стресса и оптимизации питания растения наращивают биомассу и способны эффективно реализовать свою видоспецифичную стратегию по отношению к никелю.

Данные последних исследований подтверждают, что бархатцы способны выступать в роли эффективных аккумуляторов никеля в определенных почвенных условиях, а их антиоксидантная система позволяет нейтрализовать остаточный окислительный стресс [40]. Таким образом, совместное использование минерального сорбента и культуры бархатцев представляет собой перспективный подход для фитостабилизации и фитоэкстракции никеля на загрязненных городских территориях.

Заключение

На примере агропочвы и образцов почв, отобранных в городах с различным уровнем техногенной нагрузки, показано, что добавление вермикулит-серпентинового концентрата в почвы увеличивает содержание кислоторастворимых форм кальция и магния и оптимизирует соотношение Ca/Mg. Одновременно происходит стабилизация содержания подвижных форм кремния и фосфора.

Применение ВСК оказывает дифференцированное влияние на содержание актуально подвижной фракции тяжелых металлов. Содержание подвижной меди достоверно снижается во всех исследованных образцах независимо от уровня техногенной нагрузки. В отношении никеля установлена зависимость от исходного загрязнения: в слабозагрязненной агропочве при содержании ВСК 10-50 % по массе подвижность Ni возрастает от 1,5 до 2,5 мг/кг, а при дозах более 60 % опускается ниже фоновых значений; в почвах Мончегорска с высоким уровнем загрязнения (актуально подвижный Ni до 180 мг/кг) внесение ВСК приводит к устойчивому снижению подвижных форм никеля.

Установлено, что внесение ВСК в почвы не оказывает токсического воздействия на тест-растения (*Tagetes patula*). Отсутствие фитотоксичности подтверждено увеличением массы корневых систем в диапазоне содержания ВСК 10-60 % от 0,09-0,1 до 0,13-0,18 г/растение, что свидетельствует об адаптационных реакциях растений на субстрат с высоким содержанием потенциально подвижных форм металлов при их низкой фактической доступности.

Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности использования крупнотоннажных отходов горно-добывающей промышленности – бедных вермикулит-сунгулитовых руд – для восстановления нарушенных земель Арктической зоны РФ. Фракцию менее

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

20 мм, содержание которой составляет 80 % по массе бедных руд, целесообразно применять для восстановления растительности на территориях с нулевой биологической продуктивностью [5], а из фракции более 20 мм получать вермикулит-серпентиновый концентрат с высоким содержанием вермикулита и серпентина, что позволит снизить норму внесения материала при целевом использовании на локальных участках. Вермикулит-серпентиновый концентрат может быть рекомендован в качестве мелиоранта для рекультивации городских деградированных почв, характеризующихся низким содержанием макроэлементов и загрязненных тяжелыми металлами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шибаева Д.Н., Аверин А., Асанович Д.А. и др.* Оценка предпосылок обогащения вермикулит-сунгулитовой руды фотометрическим методом сепарации // Проблемы недропользования. 2019. № 2. С. 130-137. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.130

2. *Нижегородов А.И., Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б.* Совершенствование технологии переработки сунгулит-вермикулитовых конгломератов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 4. С. 98-109. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/230

3. *Нижегородов А.И.* Энерготехнологический агрегат для термообработки сунгулитовых конгломератов Ковдорского месторождения // Горный журнал. 2017. № 6. С. 58-62. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.11

4. *Михайлова И.В., Кременецкая И.П., Дрогобужская С.В.* Результаты полевого эксперимента по использованию горнопромышленных отходов предприятия «Ковдорслюда» для выращивания кормовых культур в Мурманской области // Продовольственная безопасность: прошлое, настоящее, будущее. Материалы круглого стола (с международным участием), 24 января 2023, Луганск, Россия. В 2-х частях. Часть II. Луганск: Ноулидж, 2023. С. 40-51.

5. *Иванова Т.К., Слуковская М.В., Мосендз И.А. и др.* Модифицированные материалы на основе слоистых силикатов как мелиоранты для ремедиации подзола техногенной пустоши // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2021. Т. 16. № 4. С. 370-388. DOI: 10.22363/2312-797X-2021-16-4-370-388

6. *Mota J.F., Garrido-Becerra J.A., Merlo M.E. et al.* The Edaphism: Gypsum, Dolomite and Serpentine Flora and Vegetation // The Vegetation of the Iberian Peninsula. Springer, 2017. P. 277-354. DOI: 10.1007/978-3-319-54867-8_6

7. *Mota J., Merlo E., Martínez-Hernández F. et al.* Plants on Rich-Magnesium Dolomite Barrens: A Global Phenomenon // Biology. 2021. Vol. 10. Iss. 1. № 38. DOI: 10.3390/biology10010038

8. *Otunola B.O., Ololade O.O.* A review on the application of clay minerals as heavy metal adsorbents for remediation purposes // Environmental Technology & Innovation. 2020. Vol. 18. № 100692. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100692

9. *Xilin Li, Qi Wang, Ling Liu, Siyuan Liu.* The performance of calcined serpentine to simultaneously remove fluoride, iron and manganese // Water Supply. 2022. Vol. 22. Iss. 3. P. 2750-2766. DOI: 10.2166/ws.2021.439

10. *Yuzhen Huang, Xiuxia Yang, Peiyue Liu et al.* Thermally activated serpentine: A dual-function adsorbent for simultaneous heavy metal immobilization and soil pH regulation in acidified agricultural systems // Pedosphere. 2026 (in press) DOI: 10.1016/j.pedsph.2026.02.008

11. *Shichao Ji, Fang Huang, Shaoze Wang et al.* Identifying serpentine minerals by their chemical compositions with machine learning // American Mineralogist. 2024. Vol. 109. № 2. P. 315-324. DOI: 10.2138/am-2022-8688

12. *Beglaryan H., Isahakyan A., Zulumyan N. et al.* A study of magnesium dissolution from serpentinites composed of different serpentine group minerals // Minerals Engineering. 2023. Vol. 201. № 108171. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108171

13. *Aspiotis S., Schlüter J., Hildebrandt F., Mihailova B.* Raman spectroscopy for crystallochemical analysis of Mg-rich layered silicates: Serpentine and talc // Journal of Raman Spectroscopy. 2023. Vol. 54. Iss. 12. P. 1502-1516. DOI: 10.1002/jrs.6601

14. *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

15. *Slukovskaya M., Dvornikov Yu., Ivanova T. et al.* Topographic Wetness Index as a Factor of the Toxic Metals' Accumulation by the Alkaline Sorption Barrier and the Choice of Revegetation Strategy in the Subarctic // Soil Systems. 2025. Vol. 9. Iss. 2. № 52. DOI: 10.3390/soilsystems9020052

16. *Carmignano O.R.D., Vieira S.S., Brandão P.R.G. et al.* Serpentinites: Mineral Structure, Properties and Technological Applications // Journal of the Brazilian Chemical Society. 2020. Vol. 31. № 1. P. 2-14. DOI: 10.21577/0103-5053.20190215

17. *Roqué-Rosell J., Villanova-de-Benavent C., Proenza J.A.* The accumulation of Ni in serpentines and garnierites from the Falcondo Ni-laterite deposit (Dominican Republic) elucidated by means of μXAS // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2017. Vol. 198. P. 48-69. DOI: 10.1016/j.gca.2016.11.004

18. *Pengwu Huang, Zhao Li, Min Chen et al.* Mechanochemical activation of serpentine for recovering Cu (II) from wastewater // Applied Clay Science. 2017. Vol. 149. P. 1-7. DOI: 10.1016/j.clay.2017.08.030

19. *Assis Neto P.C.d., Sales L.P.B., Oliveira P.K.S. et al.* Expanded Vermiculite: A Short Review about Its Production, Characteristics, and Effects on the Properties of Lightweight Mortars // Buildings. 2023. Vol. 13. Iss. 3. № 823. DOI: 10.3390/buildings13030823

20. *Lingya Ma, Xiaoli Su, Yunfei Xi et al.* The structural change of vermiculite during dehydration processes: A real-time *in-situ* XRD method // Applied Clay Science. 2019. Vol. 183. № 105332. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105332

21. *Ling Wang.* Vermiculite // Manual of Mineral Material Science. Springer, 2026. P. 559-568. DOI: 10.1007/978-981-97-7558-3_117

22. *Jinpeng Feng, Meng Liu, Wei Mo, Xiujuan Su.* Heating temperature effect on the hygroscopicity of expanded vermiculite // Ceramics International. 2021. Vol. 47. Iss. 18. P. 25373-25380. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.05.259

23. *Yunzhu Chen, Hongjuan Sun, Tongjiang Peng et al.* Effect of Microwave Irradiation on Lead Adsorption Properties of Vermiculite with Different Particle Sizes // Materials. 2024. Vol. 17. Iss. 16. № 4152. DOI: 10.3390/ma17164152

24. *Bin Han, Bihong He, Rongyue Geng et al.* Ni(II) sorption mechanism at the vermiculite-water interface: Effects of interlayer // Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 274. P. 362-369. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.10.153

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

25. *Васильева Ж.В., Васеха М.В., Тюляев В.С.* Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 856-864. DOI: 10.31897/PMI.2023.14

26. *Brião G.V., da Silva M.G.C., Vieira M.G.A.* Dysprosium adsorption on expanded vermiculite: Kinetics, selectivity and desorption // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 630. № 127616. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127616

27. *Saltan N., Slukovskaya M., Mikhaylova I. et al.* Assessment of Soil Heavy Metal Pollution by Land Use Zones in Small Towns of the Industrialized Arctic Region, Russia // Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure. Springer, 2021. P. 100-110. DOI: 10.1007/978-3-030-75285-9_10

28. *Нижегородов А.И.* Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов // Новые огнеупоры. 2015. № 10. С. 22-27. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-10-22-27

29. *Осмоловская Н.Г., Самута В.Ю., Богомазова М.В. и др.* Фиторемедиационный потенциал некоторых декоративных растений в условиях загрязнения городских почв тяжелыми металлами // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды: Сборник материалов Годичного собрания Общества физиологов растений России, Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых, 10-15 июля 2018, Иркутск, Россия. В 2-х частях. Часть II. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. С. 1103-1105. DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-1103-1105

30. *Kravtsova A., Zinicovscaia, I., Peshkova A. et al.* Phytoremediation Capacity of *Tagetes patula* L. Under Constant Exposure to Zinc, Nickel and Chromium in Irrigation Water // International Journal of Environmental Research. 2026. Vol. 20. Iss. 1. № 4. DOI: 10.1007/s41742-025-00974-6

31. *Пухальский Я. В., Лоскутов С. И., Чукаева М. А. и др.* Биотестирование почв Шуваловского карьера через алгоритмическую обработку показателей развития саженцев декоративных культур // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 9. С. 86-100. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_86

32. *Гаврилова В.И., Герасимова М.И.* Целлюлозолитическая активность почв: методы измерения, факторы и эколого-географическая изменчивость // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2019. № 1. С. 23-27.

33. *Kome G.K., Enang R.K., Yerima B.P.K., Lontsi M.G.R.* Models relating soil pH measurements in H_2O, KCl and $CaCl_2$ for volcanic ash soils of Cameroon // Geoderma Regional. 2018. Vol. 14. № e00185. DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.e00185

34. *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

35. *Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П. и др.* Подвижные кремниевые соединения в системе *почва – растение* и методы их определения // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2016. № 3. С. 37-46.

36. *Teng Bao, Damtie M.M., Chu yan Wang et al.* Comprehensive review of modified clay minerals for phosphate management and future prospects // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 447. № 141425. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141425

37. *Xuewei Li, Xu Zhao, Juanjuan Zhang et al.* Struvite crystallization by using active serpentine: An innovative application for the economical and efficient recovery of phosphorus from black water // Water Research. 2022. Vol. 221. № 118678. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118678

38. *do Nascimento F.H., Masini J.C.* Vermiculite Modified with Fe^{3+} Polyhydroxy Cations Is a Low-Cost and Highly Available Adsorbent for the Removal of Phosphate Ions // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 8. № 1033. DOI: 10.3390/min12081033

39. *Пухальский Я.В., Лоскутов С.И., Никитичева Г.В. и др.* Влияние гуминовых кислот на фитоэкстракцию тяжелых металлов *Tagetes patula* L. // Садоводство и виноградарство. 2021. № 5. С. 10-18. DOI: 10.31676/0235-2591-2021-5-10-18

40. *Biswal B., Singh S.K., Patra A., Mohapatra K.K.* Evaluation of phytoremediation capability of French marigold (*Tagetes patula*) and African marigold (*Tagetes erecta*) under heavy metals contaminated soils // International Journal of Phytoremediation. 2022. Vol. 24. Iss. 9. P. 945-954. DOI: 10.1080/15226514.2021.1985960

***Авторы*: Ирина Петровна Кременецкая,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), https://orcid.org/0000-0003-3531-8273, **Александра Борисовна Хвостова,** *аспирант, специалист* (*Полярная опытная станция, филиал Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И.Вавилова, Апатиты, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-6537-7621, **Наталья Владимировна Салтан,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник* (*Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А.Аврорина КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-5905-9774, **Светлана Витальевна Дрогобужская,** *канд. хим. наук, доцент* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-1699-7584, **Марина Вячеславовна Слуковская,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *старший научный сотрудник* (*Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-5406-5569, **Татьяна Константиновна Иванова,** *канд. техн. наук, инженер* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *младший научный сотрудник* (*Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), tk.ivanova@ksc.ru, https://orcid.org/0000-0002-8103-2279, **Анна Геннадьевна Петрова,** *инженер* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *младший научный сотрудник* (*Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), https://orcid.org/0009-0005-7262-5709, **Андрей Игоревич Новиков,** *младший научный сотрудник* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), https://orcid.org/0000-0003-2765-8251.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0