

На правах рукописи

Захаренко
Андрей Игоревич

**РЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕДНО-
НИКЕЛЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
В КОЛЬСКОЙ СУБАРКТИКЕ**

Специальность 03.02.13 - почвоведение

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва, 2016

Работа выполнена на кафедре общего почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:	Копчик Галина Николаевна , доктор биологических наук, профессор кафедры общего почвоведения Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.
Официальные оппоненты:	Капелькина Людмила Павловна , доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории методов реабилитации техногенных ландшафтов, ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН. Сердюкова Алла Владимировна , кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры общей и региональной геоэкологии, Московский государственный областной университет (МГОУ).
Ведущая организация:	Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина (ПАБСИ).

Защита состоится: 20 декабря 2016 года в 15:30 в аудитории М-2 на заседании Диссертационного совета Д 501.001.57 при МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, стр. 12, факультет почвоведения МГУ, Учёный совет. Факс: (495) 939-29-47.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ им. М.В. Ломоносова и на сайте факультета почвоведения <http://soil.msu.ru>.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, по указанному выше адресу
Автореферат разослан "....." 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Никифорова А.С.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Цветная металлургия занимает одно из ведущих мест в структуре промышленности России, одновременно поставляя в окружающую среду большой спектр загрязняющих веществ. Проблема загрязнения окружающей среды газопылевыми выбросами предприятий медно-никелевой промышленности весьма актуальна для Кольского полуострова. Горно-металлургические комбинаты (ГМК) «Североникель» и «Печенганикель», крупнейшие источники выбросов диоксида серы (SO₂) и тяжёлых металлов (ТМ) в северной Европе, ответственны за загрязнение 45% территории полуострова (Кашулина, 2002). Длительное воздействие атмосферного загрязнения совместно с суровым климатом привело к дигрессии лесных экосистем и формированию вблизи комбинатов обширных техногенных пустошей (Крючков, Макарова, 1989; Лесные экосистемы..., 1990; Капелькина, 1993; Евдокимова, 1995; Лукина, Никонов, 1996; Копчик и др., 1998, 2013; Черненко, 2002; Кашулина и др., 2010). С 1990 года объёмы выбросов сократились в несколько раз. Однако выпадения ТМ вблизи комбинатов остаются значительными при заметном вкладе техногенной пыли из низко расположенных источников (Kashulina et al., 2014). С 2003 года ведутся работы по ремедиации техногенных территорий с целью восстановления нарушенных экосистем с помощью двух различных подходов – хемофитостабилизации и перекрытия загрязнённых почв вновь созданным органоминеральным слоем.

Цель работы – анализ эффективности и развитие основных методов ремедиации загрязнённых почв вблизи медно-никелевых комбинатов в Кольской Субарктике. Для выполнения цели поставлены следующие задачи:

- Анализ и обобщение сведений об основных подходах к ремедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами.
- Оценка деградации почв под воздействием техногенного загрязнения вблизи комбината «Североникель» в Кольской Субарктике.

- Сравнительный анализ воздействия различных мелиорантов на подвижность и биодоступность никеля и меди в почвах по данным модельных экспериментов.
- Характеристика состояния почв после ремедиации техногенных пустошей.
- Оценка эффективности различных методов ремедиации загрязненных тяжелыми металлами почв.

Основные положения, выносимые на защиту

Почвы техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» в Кольской Субарктике, подверженные длительному атмосферному загрязнению, сильно деградированы: обеднены элементами минерального питания, загрязнены ТМ, эродированы. Под влиянием техногенной нагрузки значительная часть подзолов трансформирована в хемоземы и абраземы.

Словакит, известь и вермикулит являются эффективными мелиорантами, способствующими снижению кислотности, связыванию ТМ и созданию благоприятных для растений условий в загрязненных почвах. Для практического применения наиболее целесообразно использование извести.

Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей зависит от применяемой технологии. Перекрытие загрязненных почв вновь созданным органоминеральным слоем с последующими известкованием и удобрением способствует долговременному снижению кислотности, уменьшению доступности ТМ, улучшению обеспеченности элементами питания. Экономически выгодная хемофитостабилизация дает кратковременный эффект, нуждающийся в постоянном поддержании.

Научная новизна

На основании детального сопряженного анализа морфологических и химических свойств охарактеризовано состояние почв техногенных пустошей, изменение классификационной принадлежности почв в результате деградации и их трансформация после ремедиации в условиях продолжающегося загрязне-

ния в северотаежной зоне Кольского полуострова. Выявлены снижение кислотности, улучшение обеспеченности элементами питания и изменения содержания ТМ в почвах, степень которых зависит от способа ремедиации. Впервые доказана эффективность применения словакита в качестве мелиоранта кислых загрязненных ТМ почв Кольской Субарктики. При помощи математического моделирования показана целесообразность использования извести грубого фракционного состава для пролонгации ее действия.

Практическая значимость

Результаты работы могут быть использованы для коррекции применяемых методов ремедиации почв в части доз, фракционного состава и сроков внесения извести. Опыт ремедиации почв техногенных пустошей Кольской Субарктики может быть распространен на кислые почвы легкого гранулометрического состава других промышленных регионов, загрязненные ТМ. Показана необходимость мониторинга свойств почв в ходе ремедиации для контроля обеспеченности элементами питания и подвижности ТМ.

Апробация работы

Материалы диссертации доложены и обсуждены на российских и международных научных конференциях: Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2010, 2012 (Москва, 2010, 2012); Докучаевских молодёжных чтениях (Санкт-Петербург, 2011, 2012); CIS IHSS on Humic Innovative Technologies и daRostim «Humic Substances and Other Biologically Active Compounds in Agriculture» (Москва, 2014); на заседаниях кафедры общего почвоведения (Москва, 2015, 2016). По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 2 статьи в рекомендованных ВАК изданиях, 1 статья и 6 тезисов докладов в материалах конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы, изложена на 130 страницах, включает 13 таблиц, 13 рисунков. Список литературы состоит из 255 источников, среди которых 172 на иностранном языке.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Г.Н. Копцик. Отдельно выражает признательность всей научной группе, в лице В.В. Турбаевской, К.А. Турбабиной, А.Д. Кудрявцевой, С.Ю. Ливанцовой, М.С. Кадулина, А.И. Захаровой, И.Е. Смирновой. Благодарю А.Ф. Сабрекова за помощь в расчетах растворения извести по модели SLIM. Исследования были поддержаны РФФИ (проект № 11-04-01794-а) и ОАО «Кольская ГМК».

1. ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И МЕТОДЫ РЕМЕДИАЦИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Подробно описаны формы нахождения ТМ в почвах (Химия тяжелых металлов..., 1985; Пинский, 1997; Мотузова, 1999, 2000; Сысо, 2007; Водяницкий, 2008; Adriano et al., 2004), рассмотрена проблема биологической доступности (Ильин, Сысо, 2001; Khan, Jones, 2009; Nkongolo, 2013) и опасности ионов никеля и меди для живых организмов (van Assche, Clijsters, 1990; Yruela, 2005). Проанализированы различные подходы к изучению ТМ в почве (Tessier et al., 1979; Плеханова, Бамбушева, 2010). Детально рассмотрены методы ремедиации загрязнённых ТМ почв, как *in situ* (Капелькина, 1993; Копцик, 2014; Bolan, Duraisamy, 2003; Adriano et al., 2004), так и *ex situ* (Mulligan et al., 2001). Описаны примеры восстановления нарушенных почв в Большом Садбери, Канада (Gunn, 1996; Abedin, Spiers, 2006; Nkongolo et al., 2013) и в Харьявалта, Финляндия (Derome, Nieminen, 1998; Mälkönen et al., 1999; Kiikkilä, 2003).

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Природные условия Кольского полуострова

На равнинных территориях центральной части Кольского полуострова господствуют северотаежные еловые и сосновые леса с участием березы и напочвенным покровом из кустарничков, зеленых мхов и лишайников. На песчаных породах в пределах лесной зоны сформировались Al-Fe-гумусовые подзолы с типичным для них профилем: О-Е-BHF(BF,ВН)-С, занимающие разные позиции по рельефу и степени увлажнения (Переверзев, 2004).

2.2. Техногенное воздействие в регионе

Основным источником техногенного воздействия в регионе является ГМК «Североникель» в Мончегорске. Газопылевые выбросы содержат большое количество S, Ni, Cu и целый ряд других ТМ и металлоидов (Barcan, 2002). Выбросы SO₂ и Ni комбинатом «Североникель» с 1990 по 2011 год сократились почти в 8 раз, Cu – в 4 раза (<http://www.kolagmk.ru>).

Интенсивное атмосферное загрязнение в течение последних 60 лет привело к техногенной дигрессии сосновых и еловых лесов, деградации почв и формированию техногенных пустошей (Лесные экосистемы..., 1990; Черненко и др., 1995; Лукина, Никонов, 1996; Копчик и др., 1998, 2013; Цветков, 1999; Евдокимова и др., 2011; Kozlov, Zvereva, 2007). В радиусе ≈5 км от комбината «Североникель» древесная растительность представлена угнетёнными единичными особями березы (*Betula subarctica*) и ивы (*Salix caprea* и *S. phylicifolia*), наземная растительность – разреженными куртинами вороники и брусники (Лукина, Черненко, 2008).

2.3. Объекты исследования

Исследуемые участки находились в локальной зоне комбината «Североникель» в автономных позициях рельефа (Рисунок 2.1). Объектами исследования стали почвы на 11 участках: 3 участках пустошей, 6 – ремедиации с нанесённым слоем, и 2 – хемофитостабилизации (Таблица 2.1). Почвенные разрезы были расположены на участках пустошей, прилегающих к участкам ремедиации и служивших в качестве контроля. Исследуемые почвы представляли собой абразёмы (2003/6), хемозёмы по подзолу (2004/5) и подзолы (2007/8) на моренных отложениях. Все минеральные горизонты были представлены супесью и песком и не обладали выраженной структурой.

На участке 2007/8 (пустошь вблизи участков ремедиации 2007 и 2008 гг.) диагностирован подзол иллювиально-железистый химически загрязнённый (Oex-BF-BC-C). Почва сохранила все типичные горизонты, но подстилка сильно деградирована и смешана с подзолистым горизонтом.

Таблица 2.1 Сводная информация о почвах

Название участка *	Удалённость от комбината, км	Год проведения ремедиации	Почвенный профиль
Техногенные пустоши (контроль)			
2003/6	1,9	-	BF-BC-C
2004/5	4,6	-	X-E-BF1-BF2-BC-C
2007/8	2,6	-	Oex-BF-BC-C
Участки хемофитостабилизации			
2004	4,5	2004	RY-E-BF-BC-C
2007	2,5	2007	BC-C
Участки с нанесенным слоем			
2003	2,6	2003	TRrr-C
2006	1,9	2006	TRrr-BC-C
2004	3,0	2004	TRrr-BF-BC-C
2005	2,3	2005	TRrr-BF-BC-C
2007	4,1	2007	TRrr-BC-C
2008	4,6	2008	TRrr-BC-C

Почва на участке 2004/5 (пустошь вблизи участков ремедиации 2004 и 2005 гг.) описана как хемозём, загрязненный Cu и Ni по подзолу (X-E-BF1-BF2-BC-C,). Поверхностный горизонт представлен органическими остатками сильной степени

разложения с примесью тонкодисперсных минеральных частиц и высоким содержанием доступных соединений Ni (230 мг/кг) и Cu (800 мг/кг).

Абразём альфегумусовый иллювиально-железистый (BF-BC-C) (участок 2003/6) расположен на пустоши рядом участками ремедиации 2003 и 2006 гг. Развитие процессов эрозии привело к полной потере органогенного (O) и

подзолистого (E) горизонтов.

Ремедиация техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» проводится с 2003 года

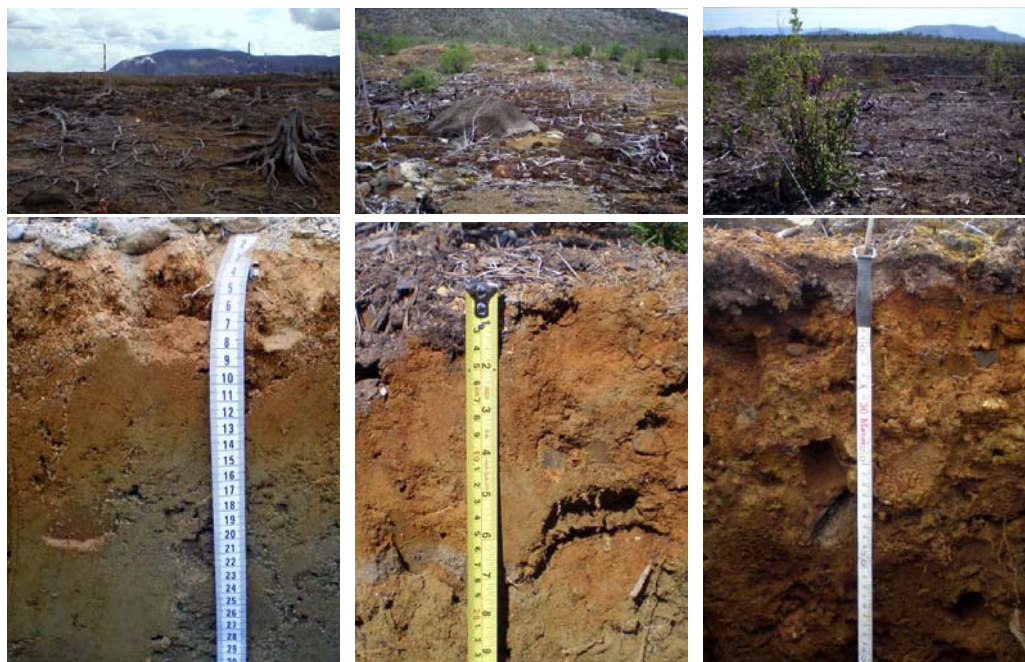


Рисунок 2.1 Общий вид техногенных пустошей (вверху) и профилей почв (внизу) в окрестностях Мончегорска: 2003/6 (слева), 2004/5 (в центре) и 2007/8 (справа).

Мончегорским лесхозом по рекомендациям Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН при поддержке Кольской ГМК. Было использовано два подхода: хемофитостабилизация и нанесение сконструированного плодородного слоя.

В ходе хемофитостабилизации были высажены ивы и берёзы в почву без ее обработки, затем посеяны травяные смеси с преобладанием злаков и внесены известковая мука (преимущественно 2 т/га) и азофоска (1 т/га).

Ремедиация путем перекрытия загрязнённых почв новым слоем включала планирование поверхности, подготовку органоминерального субстрата из торфа, песка, опилок и осадка сточных вод (ОСВ) в различных комбинациях и распределение его по поверхности. Затем, как и при хемофитостабилизации, следовали высадка деревьев и посев трав с внесением известковой муки и азофоски в тех же дозах (сведения Мончегорского лесничества).

Высаженные деревья обладали высокой приживаемостью, на некоторых участках наблюдался массовый самосев ив. Особенно выделяется участок 2003-го года с хорошим состоянием и максимальным проективным покрытием саженцев (21%). Среди трав преобладают *Phleum pratense*, *Deschampsia cespitosa*, *Deschampsia flexuosa*, встречаются *Chamerion angustifolium*, *Elytrigia repens*, *Poa pratensis*, *Equisetum arvense*. Общее число видов растений на каждом участке не превышало 15, на всех участках – 30.

2.4. Методы исследования

При характеристике почв использовали профильный метод; из разных стенок разрезов были взяты смешанные образцы каждого горизонта. Для учета пространственного варьирования исследуемые участки размером 20*20 м размечали на 4 площадки размером 10*10 м, на каждой из которых из поверхностных и подповерхностных горизонтов отбирали по 9 индивидуальных образцов почв, используемых в дальнейшем для подготовки двух смешанных образцов с каждой площадки, восьми с каждого участка.

Эффективность мелиорантов для ремедиации загрязнённых ТМ почв исследовали в лабораторном модельном эксперименте с внесением Ni и Cu и

высадкой овсяницы красной (*Festuca rubra*). В эксперименте использовали иллювиальный горизонт подзолов, содержащий значительную массу корней и зачастую выходящий на поверхность на техногенных пустошах вследствие эрозии. Для моделирования влияния предельных нагрузок в половину образцов были внесены 80 мг/кг Ni и в другую половину 300 мг/кг Cu в виде нитратов.

На основании литературных данных (Капелькина, 2006; Abollino et al., 2007; Shi et al., 2009) и предварительных исследований (Смирнова и др., 2007) для постановки эксперимента было выбрано 6 мелиорантов: вермикулит, цеолит (клиноптилолит), апатит, суперфосфат, известь и словакит (SLOVAKITE®). Словакит представляет механическую смесь доломита, диатомита, смектита, цеолита, альгинита и применяется для снижения кислотности и связывания ТМ (Tica et al., 2011). Мелиоранты вносили в виде фракции 0-2 мм в дозах 2% от массы почвы, известь – в расчете на величину гидролитической кислотности. Контролем послужили варианты без добавления мелиорантов. Эксперимент проводили в 4х-кратной повторности. После трех недель вегетации растения были срезаны, определена длина и фитомасса побегов и корней.

После окончания эксперимента в водных вытяжках с соотношением почва:раствор 1:2, профильтрованных через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм, были измерены концентрации Ni и Cu методом атомной абсорбции, углерода растворимых органических соединений (РОУ) методом каталитического окисления.

Образцы почв просеивали (сито Ø 2мм) определяли влажность на влагоанализаторе Kern MLB 50-3, pH водной и солевой суспензий на pH-метре Mettler Toledo Seven Multi с электродом Mettler Toledo Inlab 413, обменную кислотность в 1 М вытяжке KCl, гидролитическую в 1 М вытяжке CH₃COONa с pH 8.2, содержание подвижного Р по Кирсанову. Содержание подвижных (доступных для растений) форм металлов (Ca, Mg, K, Mn, Ni, Cu, Zn) определяли в 1 М ацетатно-аммонийной вытяжке и оксалаторастворимых Al, Fe, Mn, Ni и Cu на масс-спектрометре (ICP MS) Agilent 7000с. Все результаты были пересчитаны на абсолютно-сухую навеску.

Статистическая обработка включала описательную статистику и корреляционный анализ (в Microsoft Excel), а также сравнение средних по критерию Краскела-Уоллиса с попарной проверкой по критерию Уилкоксона в программе Statistica. Данные представлены в виде таблиц со значениями «среднее $\pm$ стандартное отклонение» и диаграмм, где столбцами обозначены средние, «усами» – стандартные отклонения. Для расчётов, связанных с поведением извести, использована математическая модель SLIM (Warfvinge, Sverdrup, 1989).

3. ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕЛИОРАНТОВ НА ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ В ЛАБОРАТОРНОМ МОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

3.1. Влияние мелиорантов на почвенные свойства, определяющие подвижность и токсичность ТМ

Исследуемые почвы сильноокислые, в контрольных вариантах рН почв составлял 4,1-4,4. Известковые материалы (словакит и известь) значительно увеличивали рН почв: словакит в среднем до 7,1, известь до 5,4, вермикулит до 4,7-4,9 (Таблица 3.1). Остальные мелиоранты влияли на рН незначительно. В вариантах с внесением словакита наблюдалось значительное, до 200%,

Таблица 3.1 рН и содержание водорастворимых С, Ni и Cu

Поллютант	Мелиорант	рН	РОУ, мг/кг	ТМ, мг/кг
Ni	Контроль	4,4 $\pm$ 0,1	65,0 $\pm$ 6,0	26,0 $\pm$ 1,4
	Вермикулит	4,9 $\pm$ 0,1	53,7 $\pm$ 3,9	4,0 $\pm$ 0,7
	Цеолит	4,5 $\pm$ 0,1	65,2 $\pm$ 21,4	23,5 $\pm$ 8,8
	Известь	5,4 $\pm$ 1,7	70,1 $\pm$ 1,7	4,1 $\pm$ 1,7
	Словакит	7,2 $\pm$ 0,2	141,0 $\pm$ 21,5	0,5 $\pm$ 0,1
	Апатит	4,5 $\pm$ 0,1	65,4 $\pm$ 9,3	20,7 $\pm$ 1,3
	Суперфосфат	4,8 $\pm$ 0,1	61,5 $\pm$ 8,8	9,0 $\pm$ 3,0
Cu	Контроль	4,1 $\pm$ 0,1	79,5 $\pm$ 8,8	14,5 $\pm$ 1,5
	Вермикулит	4,7 $\pm$ 0,0	47,0 $\pm$ 4,9	1,2 $\pm$ 0,2
	Цеолит	4,2 $\pm$ 0,0	58,0 $\pm$ 11,0	7,4 $\pm$ 0,8
	Известь	5,4 $\pm$ 0,1	80,7 $\pm$ 10,3	0,5 $\pm$ 0,1
	Словакит	7,1 $\pm$ 0,2	140,2 $\pm$ 9,2	0,5 $\pm$ 0,0
	Апатит	4,2 $\pm$ 0,1	62,7 $\pm$ 11,5	7,7 $\pm$ 0,3
	Суперфосфат	4,6 $\pm$ 0,1	81,8 $\pm$ 5,9	1,8 $\pm$ 0,1

увеличение содержания РОУ из-за присутствия в мелиоранте альгинита (Таблица 3.1). Суперфосфат, цеолит, апатит и известь не влияли на содержание РОУ в почвах. Внесение вермикулита в

загрязненные Cu почвы сопровождается их обеднением РОУ на 40%. Возмож-

но, это связано с сорбцией минералом корневых выделений из-за концентрации корней вокруг частиц вермикулита.

ТМ в значительной степени были поглощены почвами: только 32% Ni и 5% Cu остались в составе водорастворимых соединений в контроле. При внесении словакита содержание водорастворимых Cu и Ni снижалось в 50 и 30 раз соответственно и не превышало 0,5 мг/кг.

Также оказали влияние известь и вермикулит – концентрации Ni в среднем не превышали 15%, Cu – 4 и 9% от их содержания в контроле. Внесение суперфосфата и апатита в использованных дозах привело к значимому, но недостаточному снижению содержания водорастворимых Ni и Cu. Цеолит снижал подвижность Cu, но не Ni.

3.2. Влияние мелиорантов на тест-культуру

В почвах со словакитом, известью и вермикулитом наблюдалось равномерное прорастание и развитие растений; тогда как в вариантах с апатитом и цеолитом – замедленное прорастание и неравномерное развитие растений. Средняя длина и масса побегов овсяницы увеличивалась при внесении мелиорантов в ряду суперфосфат – известь – вермикулит – словакит, в большинстве случаев статистически значимо отличаясь от контроля ($p < 0,05$) (Рисунок 3.1). Длина корней значимо превышала контрольные значения лишь в вариантах с добавлением вермикулита и словакита в загрязненные Ni почвы, извести и словакита в загрязненные медью почвы. Апатит и цеолит не оказали значимого воздействия на величину фитомассы (Рисунок 3.2).

Выявлена тесная прямая связь длины и массы побегов овсяницы с pH (r из (0,73;0,78), $p < 0,05$) и весьма тесная обратная связь с содержанием водорастворимых Ni (r из (-0,94;0,99), $p < 0,05$) и Cu (r из (-0,91;-0,95), $p < 0,05$) в почвах. Длина и масса корней овсяницы также тесно связана с содержанием водорастворимого Ni (r из (0,73;0,78), $p < 0,05$) в загрязненных им почвах и весьма тесно – с pH (r из (0,84;0,86), $p < 0,05$) в загрязненных медью почвах. Это хорошо согласуется с представлениями о токсичном воздействии на рост и развитие

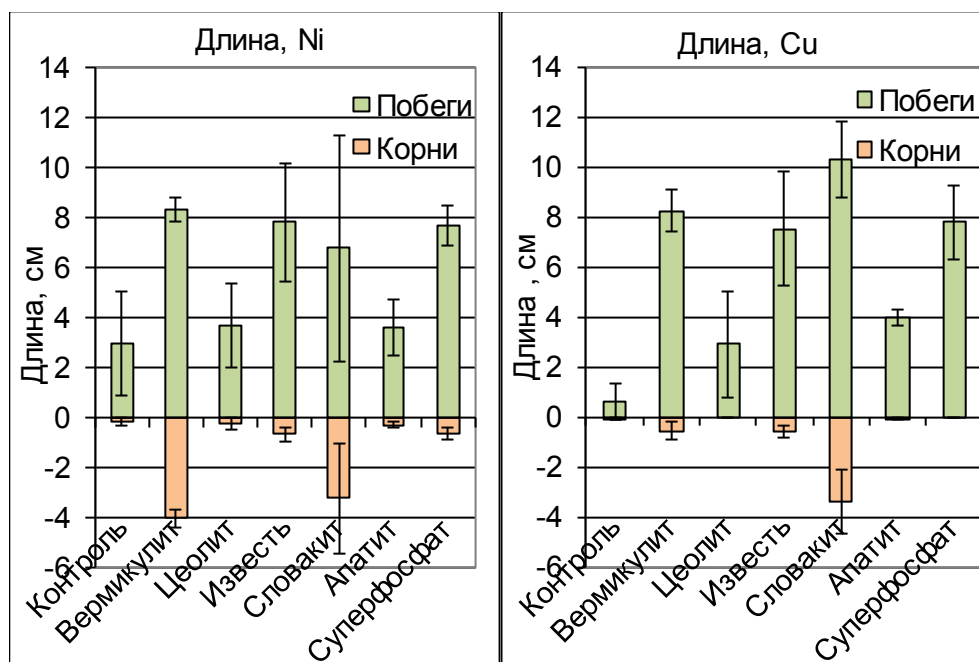


Рисунок 3.1 Длина проростков овсяницы красной на загрязнённых Ni (слева) и Cu (справа) почвах.

растений
наиболее
подвижных и
доступных для
растений
водораствори-
мых ТМ,
поведение
которых, в свою
очередь, в
значительной
степени
регулируется

кислотностью и содержанием органического вещества. Результаты экспери-
мента свидетельствуют о высокой способности словакита и извести к связыва-
нию и уменьшению токсичности Ni и Cu в загрязнённых почвах, однако
использование импортного словакита экономически не оправдано. Внесение
извести целесообразно из-за её значительной дешевизны по сравнению с

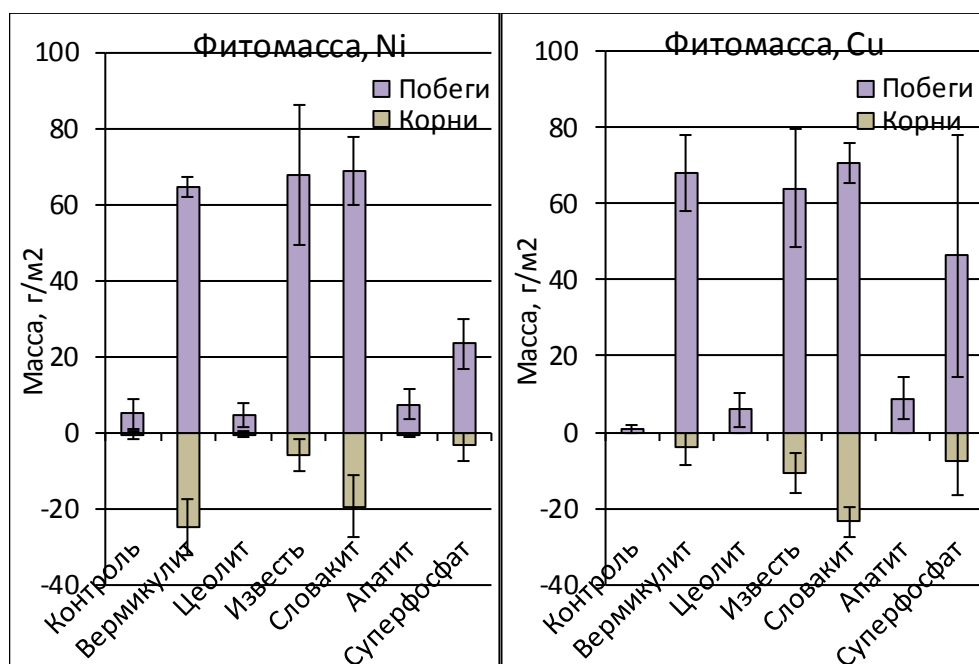


Рисунок 3.2 Фитомасса овсяницы красной на загрязнённых Ni (слева) и Cu (справа) почвах.

другими
мелиорантами и
успешным
опытом
применения для
ремедиации
техногенных
пустошей
(Kiikkilä, 2003;
Abedin, Spiers,
2006; Nkongolo

et al., 2013).

Использование вермикулита Ковдорского месторождения можно считать целесообразным при решении проблем низкой плотности частиц и их подверженности размыву. Внесение быстро растворимого суперфосфата обуславливает значимое снижение подвижности Ni и, особенно, Cu в почвах за счет осаждения их с фосфат-ионами, однако, его влияние на продуктивность растений выражено в меньшей степени. Внесение медленно растворяющегося апатита малоэффективно и практически не влияет на рост и развитие растений в течение срока модельного эксперимента. Не выявлено влияние цеолита на подвижность и токсичность ТМ.

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ ТЕХНОГЕННЫХ ПУСТОШЕЙ ВБЛИЗИ КОМБИНАТА «СЕВЕРНИКЕЛЬ»

Эффективность ремедиации почв при загрязнении ТМ можно оценивать как непосредственно по изменению содержания подвижных соединений поллютантов, так и по изменению почвенных свойств, определяющих подвижность ТМ. Основными факторами, обуславливающими подвижность ТМ в кислых почвах лёгкого гранулометрического состава, характерных для исследуемого региона, являются кислотность и сорбционная способность почв, определяемая количеством и составом органического вещества и оксалаторастворимых соединений Fe, Al и Mn, а также содержание ионов других металлов, влияющих на подвижность поллютантов, например Ca (Химия тяжелых металлов..., 1985; Копчик и др., 2013).

При рассмотрении проблемы загрязнения ТМ важно учитывать не только подвижность ТМ, но и пригодность почвы для произрастания растений, что определяется содержанием элементов минерального питания и микроэлементов. Основываясь на анализе перечисленных почвенных показателей можно судить об эффективности ремедиации.

4.1. Кислотность почв пустошей и участков ремедиации

Почвам пустошей в зоне действия ГМК "Североникель" свойственна сильноокислая реакция среды, значения pH_{H_2O} иллювиального горизонта

Таблица 4.1 Кислотные свойства почв
окрестностей Мончегорска

Тип участка	Участок	pH _{H2O}	pH _{KCl}	H _{об} , смоль(+)/кг	H _г , смоль(+)/кг
Поверхностные горизонты					
Пустоши (контроль)	2006/3	Горизонт отсутствовал			
	2004/5	4,5 ± 0,2	4,0 ± 0,1	12,46 ± 2,19	42,6 ± 7,6
	2007/8	4,4 ± 0,0	3,8 ± 0,1	7,09 ± 0,52	31,4 ± 13,0
ХФ*	2004	4,8 ± 0,0	4,3 ± 0,1	7,22 ± 1,73	18,3 ± 8,6
	2007	Горизонт отсутствовал			
Перекрытие слоев	2003	5,3 ± 0,2	5,2 ± 0,1	0,46 ± 0,22	5,33 ± 0,45
	2004	5,9 ± 0,4	5,7 ± 0,4	0,34 ± 0,04	9,53 ± 2,80
	2005	6,5 ± 0,0	6,4 ± 0,1	0,19 ± 0,06	8,26 ± 0,59
	2006	6,0 ± 0,7	5,6 ± 0,8	1,7 ± 3,1	18,0 ± 3,0
	2007	7,1 ± 0,5	6,9 ± 0,5	0,06 ± 0,07	4,32 ± 3,20
	2008	5,4 ± 0,2	4,7 ± 0,3	5,7 ± 3,5	27,2 ± 4,8
Минеральные горизонты					
Пустоши (контроль)	2006/3	4,5 ± 0,0	4,5 ± 0,0	0,69 ± 0,10	3,72 ± 0,86
	2004/5	4,7 ± 0,1	4,4 ± 0,1	1,16 ± 0,29	3,56 ± 0,46
	2007/8	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,0	0,81 ± 0,26	4,00 ± 0,58
ХФ *	2004	4,8 ± 0,8	4,7 ± 0,9	1,77 ± 1,38	5,4 ± 3,2
	2007	4,6 ± 0,1	4,5 ± 0,1	0,35 ± 0,11	2,00 ± 0,24
Перекрытие слоев	2003	7,6 ± 0,3	7,4 ± 0,2	<0,05**	0,26 ± 0,18
	2004	6,2 ± 0,5	5,8 ± 0,4	<0,05**	0,87 ± 0,45
	2005	5,4 ± 0,2	4,9 ± 0,3	0,28 ± 0,23	2,88 ± 0,64
	2006	5,2 ± 0,4	4,6 ± 0,3	0,40 ± 0,45	2,80 ± 1,63
	2007	6,4 ± 0,3	5,8 ± 0,3	<0,05**	0,63 ± 0,11
	2008	5,6 ± 0,1	5,0 ± 0,1	1,23 ± 0,25	1,79 ± 0,38

* Хемофитостабилизация

** ниже предела обнаружения

составляют 4,2-4,6 (Таблица 4.1), что в целом соответствует значениям pH в ненарушенных подзолах (Переверзев и др., 2000) и подтверждаются литературным данными (Кашулина и др., 2015). Значения pH_{H2O} почв участков хемофитостабилизации поверхностных горизонтов.

Значения pH_{KCl}

не отражают влияния хемофитостабилизации, что свидетельствует о недостаточной эффективности проведенных мероприятий. Значения pH сконструированных слоев превосходят значения pH поверхностных горизонтов почв пустошей в среднем на 1,8 единицы. В минеральных горизонтах значения pH_{H2O} и pH_{KCl} почв участков ремедиации со вновь созданным слоем и пустошей отличаются в среднем на 1,5 единицы ($p < 0,05$). Максимальное увеличение pH с глубиной (на 2,3 единицы) характерно для почв наиболее старого участка ремедиации – 2003 года заложения.

Максимальные значения (Таблица 4.1) обменной и гидролитической кислотности наблюдались в органогенных горизонтах почв (хемозёмов и подзолов) техногенных пустошей и нанесенном слое на участке 2008 г. в связи с обилием органического вещества. Хемофитостабилизация приводит к снижению обменной кислотности до 7, а гидролитической – до 18 смоль(+)/кг. В нанесенных слоях большинства почв в результате обработки обменная кислотность уменьшается до 0,1-0,5 смоль(+)/кг, а гидролитическая – до 4,3-9,5 смоль(+)/кг.

Внесение извести в дозе 2 т/га не способно полностью нейтрализовать почвенную кислотность. Требуется повторное известкование кислых и слабокислых почв. Рекомендуемые дозы внесения извести для почв пустошей составляют от 3,7 до 5,5 т/га, а для вновь созданных органо-минеральных слоёв – от 4,2 до 6,9 т/га (Таблица 4.2), что, по крайней мере, вдвое превышает использованное количество извести.

Таблица 4.2 Расчётные дозы извести

Участок	Известь, т/га
Пустоши	
2006/3	3,7
2004/5	5,5
2007/8	4,0
Участки хемофитстабилизации	
2004	5,5
2007	2,8
Участки с нанесенным слоем	
2003	4,7
2004	6,9
2005	2,5
2006	4,9
2007	1,4
2008	4,2

4.2. Обеспеченность элементами минерального питания

Почвы пустошей в окрестностях ГМК «Североникель», обеднены элементами питания (Таблица 4.3). Содержание аммонийного азота в почвах участков ремедиации меньше, чем в почвах пустошей ($p < 0,001$). Это связано, по-видимому, с ингибированием процессов нитрификации при высоких концентрациях доступных соединений Ni и Cu. Угнетение и гибель растений может также приводить к накоплению минерального азота в почве вследствие резкого снижения его потребления. Из-за локального перераспределения и высокого варьирования содержания в почве поллютантов, способных ингибировать микробные процессы, наблюдается сильное варьирование содержания аммонийного азота на всех участках. Поведение нитратов в почвах при ремедиации неоднозначно. В верхних горизонтах почв пустошей среднее

Таблица 4.3 Содержание элементов питания
в почвах окрестностей Мончегорска (мг/кг)

Тип участка	Участок	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K
Поверхностные горизонты					
Пустоши (контроль)	2003/6	Горизонт отсутствовал			
	2004/5	38 ± 26	9,7 ± 7,5	7,5 ± 3,4	48 ± 28
	2007/8	10,1 ± 4,2	0,52 ± 0,37	4,57 ± 1,92	20 ± 5,5
ХФ*	2004	14 ± 16	3,7 ± 4,1	8,32 ± 0,56	43 ± 44
	2007	Горизонт отсутствовал			
Перекрытие слоев	2003	<0,3**	4,6 ± 3,5	35,1 ± 4,8	59 ± 20
	2004	<0,3**	< 0,05**	8,79 ± 1,90	58 ± 11
	2005	6 ± 12	80,8 ± 64	10,3 ± 5,4	34,1 ± 9,6
	2006	1,7 ± 3,5	< 0,05**	151 ± 45	88 ± 77
	2007	5 ± 3,9	5,5 ± 8,9	17,5 ± 9,7	63 ± 41
	2008	0,73 ± 1,45	< 0,05**	13,4 ± 4,6	79 ± 17
Минеральные горизонты					
Пустоши (контроль)	2003/6	1,56 ± 0,33	0,78 ± 0,42	2,05 ± 1,64	2,97 ± 0,77
	2004/5	0,82 ± 0,40	0,98 ± 0,34	1,80 ± 1,00	8,06 ± 1,71
	2007/8	3,3 ± 0,22	0,56 ± 0,21	1,48 ± 0,67	7,7 ± 2,9
ХФ*	2004	1,69 ± 0,70	1,62 ± 0,51	13 ± 17	6,1 ± 4,3
	2007	0,61 ± 0,41	1,00 ± 0,27	17,5 ± 9,3	30 ± 9,9
Перекрытие слоев	2003	0,84 ± 0,14	0,26 ± 0,23	13 ± 11	50 ± 20
	2004	0,8 ± 0,38	0,11 ± 0,05	7,8 ± 3,3	13,1 ± 5,8
	2005	1,26 ± 1,37	1,47 ± 2,18	2,89 ± 0,57	16,7 ± 5,0
	2006	0,35 ± 0,39	< 0,05**	20 ± 17	36 ± 20
	2007	0,59 ± 0,45	0,09 ± 0,09	29,7 ± 1,7	55 ± 22
	2008	0,54 ± 0,42	0,20 ± 0,09	18 ± 13	34 ± 14

* Хемофитостабилизация

** Ниже предела обнаружения..

содержание нитратов составляет 5,1 мг/кг, значительно не изменяется после хемофитостабилизации и сильно варьирует (от <0,05 до 80 мг/кг) в сконструированных слоях на участках ремедиации. Почвы пустошей до и после ремедиации в основном бедны

минеральными соединениями азота. При этом в почвах пустошей значительно ($p < 0,05$) больше азота. Очевидно, это следствие перераспределения лабильных соединений азота и ингибирования микробных процессов трансформации азота и корневого питания в условиях загрязнения Ni и Cu (Евдокимова, 1993). Почвы пустошей бедны P и K, как с точки зрения агрохимической оценки (Минеев, 2004), так и при сравнении с фоновыми участками (Лукина, Никонов, 1996; Кашулина, 2002).

4.3. Содержание и распределение кальция и магния в почвах

Почвы пустошей обеднены Ca и Mg. Их повышенное содержание наблюдается в остатках органогенных горизонтов, особенно в локальных понижениях (участок пустоши 2004/5). Почвы участков хемфитостабилизации не отличаются от почв пустошей по содержанию Ca и Mg (Таблица 4.4). Вероятно, это следствие смыва верхних слоёв почвы вместе с внесённой в них известковой мукой. Вследствие создания органоминерального слоя и внесения известковой муки на участках ремедиации содержание этих элементов было повышено на 1-2 порядка. Моделирование растворения известки в почве проводили в соответствии с математической моделью SLIM (Warfvinge, Sverdrup, 1989). Для характеристики входных данных использовали результаты исследований почв техногенных пустошей вблизи ГМК «Североникель» и литературные сведения (Евтюгина, Асминг, 2013). Оценку удельной поверхности известковой муки проводили, исходя из ее фракционного состава согласно ГОСТ 14050-93. Для сравнения с расчетными данными использовали долю кальция в ППК, оцененную по данным 2004, 2006 и 2010 годов (Исаева, Белова, 2012) и 2010 г. (Копчик и др., 2013).

Таблица 4.4 Содержание Ca и Mg в почвах окрестностей Мончегорска (мг/кг)

Тип участка	Участок	Ca	Mg
Поверхностные горизонты			
Пустоши (контроль)	2003/6	Горизонт отсутствовал	
	2004/5	146 ± 197	47 ± 44
	2007/8	19,8 ± 6,3	17,0 ± 8,0
ХФ*	2004	54 ± 21	28 ± 10
	2007	Горизонт отсутствовал	
Перекрытие слоем	2003	267 ± 129	27 ± 16
	2004	951 ± 339	166 ± 73
	2005	1272 ± 639	111 ± 56
	2006	1097 ± 965	42 ± 34
	2007	1298 ± 694	108 ± 58
	2008	1947 ± 1460	67 ± 26
Минеральные горизонты			
Пустоши (контроль)	2003/6	1,57 ± 2,27	<0,5**
	2004/5	11,0 ± 3,2	1,93 ± 0,54
	2007/8	2,38 ± 1,37	<0,5**
ХФ*	2004	13 ± 11	3,4 ± 6,8
	2007	7,2 ± 3,6	0,47 ± 0,94
Перекрытие слоем	2003	2746 ± 3052	53 ± 16
	2004	69 ± 17	16,5 ± 8,7
	2005	41 ± 12	6,2 ± 3,1
	2006	86 ± 96	6,3 ± 4,0
	2007	999 ± 1243	62 ± 35
	2008	175 ± 68	22,0 ± 3,2

* Хемофитостабилизация

**ниже предела обнаружения

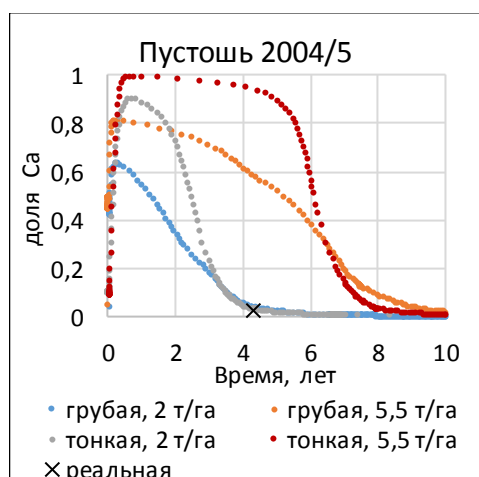
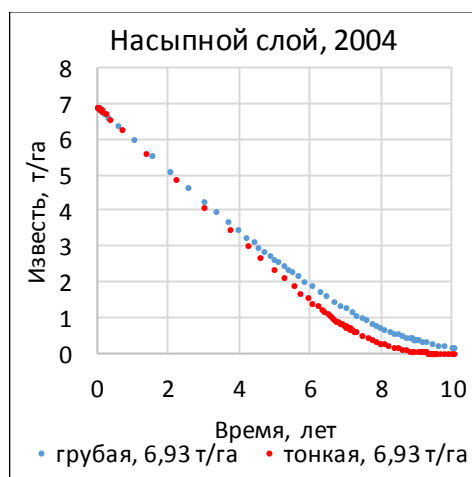
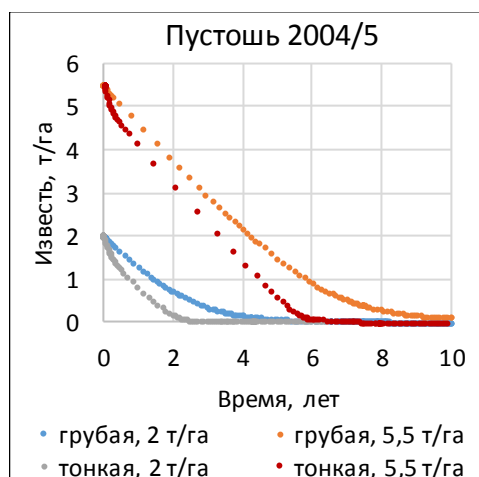


Рисунок 4.1 Динамика растворения извести (сверху) и доли Са в ППК (снизу) в почвах пустошей (слева) и в нанесенном слое (справа).

Расчетные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными, коэффициент детерминации для иллювиального горизонта $R^2=0,97$. Согласно расчетам, последствие внесенных доз извести (2 т/га) в почвы пустошей не превышает 2-

5 лет (Рисунок 4.1). Это согласуется с кислой реакцией среды (рН 4,6-4,8) и низкой долей Са (3-8%) в поверхностных горизонтах почв, наблюдаемых спустя 4-7 лет после проведенной хемотростабиллизации. По результатам моделирования видно, что рекомендованные дозы извести будет растворяться не менее 5-6 лет, а эффект в виде повышенной доли Са в ППК будет ещё более длительным. В загрязнённых почвах это может привести к вытеснению ТМ из ППК и кратковременному увеличению их концентрации в растворе, что может нанести вред недавно высаженным растениям (Копчик, 2014), как показано в лабораторных (Серёгин, Кожевникова, 2009; Boyd, Martens, 2005) и полевых экспериментах (Derome, Saarsalmi, 1999). Во избежание таких эффектов имеет смысл вносить известь заранее, по крайней мере, за год, до посадки деревьев и посева трав на пустоши.

Полученные результаты согласуются со сделанными ранее (Копчик и др., 2013) выводами о том, что использование извести более грубого помола (песка или крошки) будет способствовать снижению ее потерь от эрозии, постепенному растворению, длительному сохранению в почве и долговременному поддержанию реакции среды на требуемом для иммобилизации тяжелых металлов уровне.

Следует отметить, что при промывном водном режиме и азральных выпадений ТМ необходимо внесение научно обоснованных доз извести и/или ее неоднократное применение. Расчёты показывают, что при повторном внесении известковой муки тонкого помола в почвы участков ремедиации даже спустя 10 лет доля кальция в ППК будет составлять не менее 0,2. Эффект от внесения известковой муки грубого помола пролонгирован, что особенно заметно для более кислых почв.

4.4. Распределение оксалоторастворимых соединений алюминия, железа и марганца в почвах

Большое количество оксалоторастворимых соединений Ni (80-110 мг/кг) и Cu (210-880 мг/кг) в иллювиальных горизонтах исследуемых почв свидетельствует об их заметном участии в образовании аморфных осадков. Вследствие развития эрозии и накопления поступающих с атмосферными выпадениями металлов на поверхности почв типичное для подзолов элювиально-иллювиальное распределение оксалоторастворимых соединений Fe, Al и Mn по профилю сменяется регрессивно-аккумулятивным в абраземах.

4.5. Содержание тяжелых металлов в почвах

Содержание металлов в выбросах и их поведение в почвах различно: например, Mn и Zn не закрепляются в кислых верхних горизонтах и вымываются, в то время как Ni и Cu накапливаются в поверхностных горизонтах (Евтюгина, 1994; Лукина, Никонов, 1996; Кашулина, 2002), а их содержание превосходит значения критических концентраций в десятки раз (Koptsik et al., 2007). По этой причине особый интерес представляют металлы, находящиеся в дефиците, такие как Mn и Zn или наоборот, накапливающиеся в огромных количествах,

Таблица 4.5 Содержание подвижных соединений Zn, Mn, Ni и Cu в почвах окрестностей Мончегорска, мг/кг

Тип участка	Участок	Zn	Mn	Ni	Cu
Поверхностные горизонты					
Пустоши (кон-троль)	2003/6	Горизонт отсутствовал			
	2004/5	2,97 ±2,09	5,2 ± 3,7	231 ±119	795 ± 200
	2007/8	0,14 ±0,27	2,6 ± 3,2	68 ± 29	602 ± 234
ХФ*	2004	1,48 ±2,95	3,6 ± 2,4	103 ± 24	560 ± 174
	2007	Горизонт отсутствовал			
Перекрытие новым слоем	2003	12,1 ± 3,7	4,0 ± 2,5	25,5 ± 6,0	119 ± 34
	2004	6,4 ± 5,3	8,7 ± 9,4	102 ± 24	166 ± 147
	2005	6,8 ± 5,1	10,4 ± 6,4	79 ± 38	505 ± 256
	2006	18 ± 15	7,9 ± 4,9	77 ± 58	104 ± 72
	2007	5,5 ± 3,4	6,9 ± 8,4	88 ± 43	702 ± 406
	2008	1,75 ±0,33	5,7 ± 1,9	44,1 ± 6,2	28,2 ± 6,3
Минеральные горизонты					
Пустоши (кон-троль)	2003/6	<0,2**	0,59 ±0,63	2,5 ± 1,4	58 ± 26
	2004/5	0,69 ±0,35	0,80 ±0,27	12,1 ± 4,0	19,0 ± 5,0
	2007/8	0,26 ±0,31	0,97 ± 0,4	4,95 ±2,55	41,1 ± 17
ХФ*	2004	0,81 ±1,61	0,41 ±0,32	11,8 ± 6,6	49 ± 47
	2007	<0,2**	0,52 ±0,08	3,60 ±0,72	17,5 ± 3,7
Перекрытие новым слоем	2003	12,2 ± 3,7	5,23 ±2,24	12,1 ± 6,8	58,8 ± 27
	2004	0,51 ±0,63	3,03 ±2,36	10,1 ± 4,2	33,2 ± 14
	2005	0,38 ±0,19	3,19 ±1,36	7,17 ±2,10	62,0 ± 17
	2006	2,45 ±2,14	2,68 ±1,26	12,4 ± 4,8	58,2 ± 11
	2007	0,49 ±0,42	2,57 ±1,32	6,9 ± 5,3	58,3 ± 49
	2008	<0,2**	0,99 ±0,16	4,71 ±2,25	5,6 ± 3,0

* Хемофитостабилизация **Ниже предела обнаружения

обеднены Mn и Zn как с точки зрения агрохимической характеристики, так и при сравнении с фоновыми территориями (Опекунова и др., 2006). Хемофитостабилизация никак не отражается на содержании фитодоступных Mn и Zn (Таблица 4.5). Перекрытие почв пустошей

новым сконструированным слоем сопровождается его постепенным обогащением Mn (до 10 мг/кг) и Zn (до 18 мг/кг). Однако различия незначимы из-за высокого варьирования показателей. При планировании последующих мероприятий следует учитывать, что дефицит этих микроэлементов может быть усугублён переизвесткованием, особенно большими дозами (Siebielec et al, 2007; Kowalenko, Ihnat, 2013). Поэтому рекомендуется вносить известь совместно с внесением микроэлементов.

Почвы техногенных пустошей вблизи ГМК «Североникель» сильно загрязнены Ni и Cu, валовое содержание которых достигает 5-6 и 3-7 г/кг (Koptsik et

al., 2005). Содержание подвижных соединений также велико: остатки органо-генного горизонта подзола накапливают 70 мг Ni/кг и 600 мг Cu/кг, хемозема – 230 мг Ni/кг и 800 мг Cu/кг, а выходящий на поверхность иллювиальный горизонт абразема – 2-3 мг Ni/кг и около 60 мг Cu/кг (Таблица 4.5). Такие содержания ТМ токсичны, что подтверждается отсутствием или угнетённостью растительности (Копчик и др., 2013, 2015), заторможенным дыханием почв (Кадулин, Копчик, 2013), угнетением почвенной микробиоты (Евдокимова и др., 2011, 2014).

Несмотря на сокращение выбросов и снижение концентрации ТМ в осадках (Горбачева, Ершов, 2014; Kashulina et al., 2014), сравнение полученных данных с литературными (Копчик и др., 1998, 2004; Опекунова и др., 2006; Reimann et al., 1994) показывает, что соответствующего снижения содержания металлов в почвах не происходит. Содержание подвижных соединений Cu в почвах техногенных пустошей больше, чем Ni, в связи с ее повышенным поступлением с атмосферными выбросами комбината «Североникель» с 2005 г. (по данным Кольской ГМК) и лучшим удержанием в почве.

Статистически значимое ($p < 0,05$) снижение содержания доступных соединений Cu в результате хемофитостабилизации обнаружено только в выходящем на поверхность иллювиальном горизонте абраземов на участке 2007 года (17 мг/кг), что связано, скорее, с эрозией верхнего загрязнённого горизонта, чем с изменением химических свойств. Хемофитостабилизацию, реализованную в окрестностях Мончегорска, нельзя считать эффективной, так как свойства почв после обработки значимо не отличаются от таковых почв пустошей (контроля). Для исправления ситуации целесообразно повторное известкование почв участков хемофитостабилизации дозами не менее 5 т/га для нейтрализации почвенной кислотности и токсичного действия ТМ.

В перекрывающих загрязненные почвы сконструированных слоях после ремедиации среднее содержание доступных растениям соединений Ni составило 70 мг/кг, то есть вдвое меньше, чем в поверхностных горизонтах почв пустошей ($p < 0,05$). Однако при более детальном сравнении пар «участок

ремедиации – пустошь (контроль)», расположенных на почвах разных типов, наблюдается дифференцированная картина. После ремедиации хемозема сконструированный слой содержит в несколько раз меньше металлов, чем поверхностный горизонт хемозема соответствующей пустоши (2004/5). Содержание металлов в нанесенном на поверхность подзола слое почти не меняется по сравнению с исходным (2007/8). И, напротив, содержание Cu и, особенно, Ni, в сконструированном слое заметно больше по сравнению с выходящим на поверхность иллювиальным горизонтом абразёма (2003/6).

Сконструированный органоминеральный горизонт накапливает поступающие из атмосферы металлы аналогично органогенным горизонтам нативных подзолов. Таким образом, среднее уменьшение содержания Cu в почвах в 2,5 раза ($p < 0,005$) при ремедиации техногенных пустошей еще не свидетельствует о полном успехе мероприятия. При этом вызывает опасение не только накопление металлов из аэральных выпадений, но и дополнительное перераспределение металлов с близлежащих пылящих пустошей, не затронутых ремедиацией. Решением проблемы является снижение техногенной нагрузки и форсирование ремедиации с увеличением дозы извести от 4 до 7 т/га для регулирования подвижности ТМ в зависимости от локальных условий. При этом можно рекомендовать разнесение во времени известкования и высадки деревьев для достижения максимального эффекта от обоих мероприятий.

Следует отметить хорошее состояние растительности и почв на участке ремедиации 2003 года; почвы отличались как благоприятными общими свойствами, так и относительно невысокими содержанием и запасами Ni и Cu. Кроме того, почвы характеризовались повышенными микробной биомассой и дыханием (Кадулин, Копчик, 2013). Судя по всему, это связано с особенностями состава искусственного слоя (ОСВ, опилки и песок) и его большой мощностью (около 40 см). В этой связи видится перспективным использование именно этой схемы при конструировании горизонтов.

ВЫВОДЫ

1. Подзолы, хемоземы и абраземы техногенных пустошей, сформировавшихся под воздействием длительного загрязнения выбросами комбината «Североникель» в Кольской Субарктике, кислые, обеднены элементами питания, марганцем и цинком, загрязнены никелем и медью, сильно эродированы.
2. Внесение словакита, извести и вермикулита в загрязненные почвы в условиях лабораторного модельного эксперимента приводит к значительному снижению кислотности и доступности никеля и меди, увеличению длины и фитомассы побегов и корней овсяницы красной. Применение суперфосфата менее результативно, а апатита и цеолита неэффективно.
3. Хемофитостабилизация способствует снижению актуальной и потенциальной кислотности, однако, почвы остаются кислыми. Спустя 4-7 лет после обработки почвы по-прежнему обеднены элементами питания. Обработка не приводит к значимому уменьшению содержания доступных соединений никеля и меди.
4. Ремедиация путем нанесения плодородного слоя, сконструированного на основе торфа, песка, опилок и осадка сточных вод, сопровождается значительным уменьшением кислотности и обогащением почв элементами питания (калием, кальцием, магнием, марганцем и цинком). Использование осадка сточных вод приводит к резкому обогащению почв фосфором. Содержание всех элементов питания, особенно азота, характеризуется сильным варьированием.
5. Изменения содержания никеля и меди в созданных при ремедиации плодородных слоях обработанных почв неоднозначны по сравнению с почвами пустошей. В условиях действующего производства и переноса металлов с открытых пылящих поверхностей сконструированные слои накапливают до 100 мг/кг доступного никеля и 700 мг/кг доступной меди, в 2-12 раз больше, чем нижележащие горизонты.

6. Эффективность ремедиации зависит от состава и мощности сконструированного слоя. Наиболее плодородным оказался слой мощностью около 40 см, состоящий из осадка сточных вод, опилок и песка.
7. Для снижения почвенной кислотности и иммобилизации тяжелых металлов рекомендуется увеличение доз извести при первичном известковании до 4-10 т/га и/или повторное внесение извести, в первую очередь, доломита в дозах от 4 до 7 т/га в зависимости от свойств почв.
8. Согласно расчетам по модели SLIM, использование известковой муки грубого помола будет способствовать ее постепенному растворению и продлению воздействия на 2-4 года по сравнению с мукой тонкого помола.
9. Ремедиация загрязненных почв должна сопровождаться мониторингом для своевременного выявления и коррекции негативных изменений их свойств под воздействием продолжающейся техногенной нагрузки.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Копцик Г.Н., Захаренко А.И. Влияние различных мелиорантов на подвижность и токсичность никеля и меди в загрязненных почвах // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2014. – № 1. – С. 32-37.
2. Копцик Г.Н., Смирнова И.Е., Копцик С.В., Захаренко А.И., Турбаевская В.В. Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи комбината Североникель на Кольском полуострове // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2015. – № 2. – С. 42–48.

Материалы конференций

3. Захаренко А.И. Исследование влияния различных мелиорантов на почвы, загрязнённые тяжелыми металлами «XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2010». Изд-во «Макс Пресс». Москва, 2010 С. 40-41.
4. Захаренко А.И. Поведение тяжелых металлов при ремедиации почв в зоне влияния ГМК Печенганикель «Материалы XIV Докучаевских молодежных

чтений «Почвы в условиях природных и антропогенных стрессов». СПб. 2011. С. 130-131.

5. **Захаренко А.И.** Влияние ремедиации на поведение тяжелых металлов в загрязненных почвах. «XIX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2012» М.: Изд-во «Макс Пресс», 2012. С 42-43.

6. **Захаренко А.И.** Снижение стрессового воздействия загрязнения на почвы с помощью различных мелиорантов. «Материалы XV Докучаевских молодежных чтений. «Почва как природная геомембрана». СПб., 2012. С 65-69.

7. **Захаренко А.И.**, Копчик Г.Н., Влияние различных мелиорантов на подвижность и токсичность никеля и меди в загрязненных почвах. IV Международная научная конференция "Современные проблемы загрязнения почв". 27–31 мая 2013 г., Москва, Россия, 2013. С. 396-399.

8. P. Tregubova, V. Turbaevskaya, **A. Zakharenko** et al. Application of humic substances for stabilisation of organic carbon pool in soils subjected to high technogenic contamination in kola subarctic // Bioassay Technology in Environmental Assessment of Agrocenoses and Humic Substances. Proceeding of International School 21-23 November, 2014, Lomonosov MSU, Moscow. — Moscow, 2014. — P. 159–160.

9. V. Turbaevskaya, **A. Zakharenko**, I. Smirnova, G. Koptsik / Effect of technogenic pollution and remediation on organic carbon pools in soils of kola subarctic // Bioassay Technology in Environmental Assessment of Agrocenoses and Humic Substances. Proceeding of International School 21-23 November, 2014, Lomonosov MSU, Moscow. — Moscow, 2014. — P. 162–163.