

УДК 631.5:502.654

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННО ЗАГРЯЗНЕННОГО ГРУНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАРБОНАТИТОВОГО МЕЛИОРАНТА В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОМБИНАТА

**М. В. Слуковская¹, Л. А. Иванова², Т. Т. Горбачева³,
С. В. Дрогобужская⁴, Е. С. Иноземцева², Е. Ф. Марковская¹**

¹*Петрозаводский государственный университет*

²*Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина
Кольского научного центра РАН*

³*Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН*

⁴*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева
Кольского научного центра РАН*

Представлены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния мелиоранта из карбонатитовых отходов на свойства техногенно загрязненного грунта и созданный на нем растительный покров в зоне воздействия медно-никелевого комбината на Кольском полуострове. Показано, что нанесение на поверхность техногенного грунта слоя мелиоранта из карбонатитовых отходов способствует оптимизации рН, уменьшению содержания тяжелых металлов в доступных для растений формах и увеличению пула макроэлементов в грунте. Растительный покров, сформированный на мелиоранте, обладает характеристиками, благоприятными для начального этапа восстановления растительного сообщества на техногенной пустоши.

К л ю ч е в ы е с л о в а: биологическая рекультивация, мелиорант, карбонатитовые отходы, злаковые растения, техногенная пустошь.

M. V. Slukovskaya, L. A. Ivanova, T. T. Gorbacheva, S. V. Drogobuzhskaya, E. S. Inozemtseva, E. F. Markovskaya. CHANGES IN THE PROPERTIES OF INDUSTRIALLY WASTED GROUND UPON THE APPLICATION OF CARBONATITE AMELIORANT IN THE COPPER-NICKEL SMELTER IMPACT AREA

The results of experimental studies on the effect of the ameliorant produced of carbonatite wastes on industrially wasted ground properties and the resultant plant cover in the copper-nickel smelter impact area are presented. Spreading of carbonatite ameliorant on top of the industrially wasted ground helped optimize pH, decrease available heavy metals, and increase the macro nutrient pool in the ground. The resultant plant cover possesses the characteristics favourable for the onset of revegetation processes.

К e y w o r d s: bioremediation, ameliorant, carbonatite wastes, grasses, industrial barren.

Введение

Интенсивное развитие предприятий цветной металлургии (с середины XIX века) привело к деградации наземных экосистем в зоне их аэротехногенного воздействия и возникновению техногенных пустошей как крайнего проявления этого воздействия [Remon et al., 2005]. Пустоши представляют собой открытые ландшафты с загрязненными и эродированными почвами, полностью или почти полностью (> 90 % площади) лишённые растительности вследствие влияния аэротехногенной нагрузки и сопутствующих ей вырубок леса или пожаров [Ганичева и др., 2004].

Всего в мире отмечено образование 33 техногенных пустошей; 16 из них находятся на территории Европы и России, самые крупные пустоши располагаются в Красноярском крае (400 тыс. га) и на Кольском полуострове [Kozlov, Zvereva, 2007]. Одной из них является территория около г. Мончегорска Мурманской области, где повреждено более 150 км² леса, а ощутимое влияние промышленных выбросов медно-никелевого комбината Кольской ГМК на лесные экосистемы прослеживается на площади более 240 км² [Мониторинг..., 2010].

Проблема биологической рекультивации земель, имеющих кислую реакцию среды и загрязненных тяжелыми металлами (ТМ), остается актуальной до настоящего времени. Разрабатываемая технология рекультивации таких земель должна быть направлена прежде всего на сокращение их негативного влияния на прилегающие территории; добиться этого зачастую можно лишь с помощью искусственного посева трав и нанесения на поверхность грунта мелиоранта, способствующего созданию растительного покрова и корнеобитаемого слоя, а также процессам почвообразования [Андроханов, 2012].

Для больших территорий одной из перспективных и экономически выгодных технологий восстановления грунтов, подвергшихся такого рода загрязнению, признана рекультивация *in situ* с помощью внесения в грунт нейтрализующих кислотность, иммобилизирующих металлы и содержащих питательные вещества компонентов с последующим или одновременным созданием растительного покрова [Vangronsveld et al., 1995; Ганичева и др., 2004].

Восстановление каждой достаточно большой по площади нарушенной территории ставит вопрос о необходимости раз-

работки индивидуального подхода с учетом эдафических, гидрологических, ландшафтных, климатических [Андроханов, 2012] и других условий, а также особенностей антропогенного загрязнения данной местности. Так, для оптимизации кислотности почвенных субстратов и/или уменьшения подвижности ТМ в различных регионах мира используется известняк [Bradshaw, 1997; Ягодин и др., 2004], полуобожженный известковый материал доломит [Куликов, 2001], высокощелочной модифицированный алюмосиликат берингит [Vangronsveld et al., 1995], вскрышные породы горнопромышленных предприятий [Bradshaw, 1997], компост [Farrell, Jones, 2010; Albuquerque et al., 2011] и другие органические добавки [Park et al., 2011].

В Мурманской области с ее высокоразвитым горнопромышленным комплексом большие площади занимают отвалы вскрышных пород и отходы обогащения руд различных полезных ископаемых. Такого рода материалы, как, например, вмещающие породы Хабозерского месторождения оливинитов и заскладированные отходы обогащения ОАО «Ковдорский ГОК», содержащие карбонаты и силикаты Ca и Mg, могут быть предложены в качестве мелиорантов при рекультивации техногенных пустошей, существующих на Кольском полуострове. Для проверки этого предположения в 2011 г. был проведен пилотный эксперимент, целью которого являлась оценка эффективности использования одного из видов горнопромышленных отходов для химической мелиорации загрязненного грунта, испытывающего длительное и продолжающееся в настоящее время воздействие аэротехногенных выбросов предприятия цветной металлургии, а также формирования на нем устойчивого растительного покрова.

Район, материалы и методы исследования

Работа выполнена на техногенной пустоши вблизи медно-никелевого комбината ОАО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) в Мурманской области. Экспериментальный участок находился в 0,7 км от источника выбросов (67°55,783'N, 32°51,535'E) (рассчитано при помощи программы Google Earth). Естественная растительность на участке полностью отсутствовала, грунт представлял собой видоизмененный торф с высоким содержанием меди и никеля в доступной для растений форме, превы-

шающим ПДК на 2 и 3 порядка соответственно (табл. 1). Значение pH водной вытяжки грунта составляло 3,6–4,0, массовая доля крупных (толщиной более 1 мм) растительных остатков – 0,5–21 % (в зависимости от глубины).

Таблица 1. Содержание Cu и Ni в исходном грунте (июнь 2011 г.)

Элемент	ПДК общесанитарный, мг/кг	Содержание ТМ в грунте, мг/кг				Доля доступных форм, %	
		валовое		доступные формы			
		глубина отбора пробы, см					
		0–5	5–10	0–5	5–10	0–5	5–10
Cu	3	11360	11630	4640	4230	41	37
Ni	4	6710	1520	515	440	8	29

В непосредственной близости к экспериментальному участку находился водный объект, в котором отмечено превышение ПДК_{вр} по никелю и меди соответственно на 1 и 2 порядка [Кременецкая и др., 2012]. Высокое содержание ТМ в водоеме обусловлено не только прямым поступлением загрязняющих веществ из атмосферы, но и процессами горизонтальной миграции соединений ТМ с участков, примыкающих к нему. Вода из данного объекта через систему рек и озер попадает в крупнейшее в Мурманской области озеро Имандра – водоем высшей рыбохозяйственной категории. В связи с этим рекультивация техногенной пустоши, в конечном итоге приводящая к снижению выноса поллютантов в водную среду, представляется весьма актуальной.

Характеристика мелиоранта

В качестве мелиоранта использовались отходы обогащения ОАО «Ковдорский ГОК», содержащие карбонатит. Накопленные за годы деятельности предприятия вскрышные породы и отходы обогащения к настоящему времени, по данным МГРЭ, составляют 120 млн тонн. Минеральный состав отходов обогащения включает (масс. %): карбонаты (30–40), форстерит (25–35), апатит (10–15) магнетит (0–2) и другие соединения (2–8) [Беляева и др., 2008; Лашук и др., 2011]. Теми же авторами определен гранулометрический состав отходов, которые состоят в основном из частиц размером менее 0,1 мм (в среднем около 73 %), при этом фракция 0,1–0,25 мм составляет 22 %, оставшиеся 5 % приходятся на фракцию 0,25–2 мм. Таким образом, по классификации Рухина

[1969], данный субстрат может быть определен как тонкозернистый песок.

Мелиорант имел высокое содержание доступных для растений форм кальция (12,3 %) и магния (1,8 %), существенно превышающее их содержание в грунте техногенной пустоши (табл. 2). Для него характерен дефицит доступных форм калия даже по сравнению с исходным грунтом, но отмечено 30-кратное превышение содержания доступных форм фосфора. Концентрации Cu и Ni в мелиоранте в доступных растениях формах немного превышали значения ПДК, что можно объяснить известным фактом концентрирования их в известковых породах (см. табл. 1) [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. В то же время содержание Cu и Ni в грунте техногенной пустоши значительно превышает ПДК (см. табл. 1). Концентрации Cu и Ni в мелиоранте также были существенно ниже значений кларка по классификации Виноградова (100 и 160 мг/кг соответственно) [Виноградов, 1962].

Таблица 2. Концентрация элементов в доступной форме (мг/кг) в грунте и мелиоранте (сентябрь 2011 г.)

Элемент	Исходный грунт			Грунт под слоем мелиоранта			Мелиорант
	глубина отбора пробы, см						
	0–5	5–10	10–15	0–5	5–10	10–15	
P	3	0,3	0,3	24	4	15	89
K	35	33	37	46	52	54	18
Ca	930	921	1307	2592	1173	2036	123022
Mg	97	141	186	437	496	731	1821
Cu	4458	5785	4213	1792	5256	1038	7
Ni	198	370	481	315	373	750	6

Методика формирования рекультивационного слоя и посева растений

Подготовка участка заключалась в уборке камней, выравнивании и разметке 14 площадок, каждая площадью 1 м². В опытных вариантах на их поверхность был нанесен слой мелиоранта высотой 5 см. В контрольных вариантах мелиорант не использовался.

Для создания растительного покрова применялись два инновационных запатентованных гидропонных способа ускоренного формирования фитоценозов:

Прямой посев семян (вариант 1) [International..., 2011].

Интродукция ковровой травяной дернины (вариант 2) [Патент..., 2009].

Дернина, выращенная в течение двух недель на территории, не подверженной влиянию выбросов медно-никелевого

комбината, была разделена на квадраты площадью 1 м² каждый и транспортирована на экспериментальный участок.

В эксперименте использовалась травосмесь из злаковых растений: пырей сизый (*Agropyron intermedium* (Host.) Beauv.), овсяница красная (*Festuca rubra* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.) и тимopheвка луговая (*Phleum pratense* L.), взятых в соотношении 1:1:2:2 (по массе). Согласно собственным результатам [Иванова и др., 2010], данным других исследователей [Тамберг, 1962; Святковская, 2000] и производителей рекультивационных смесей [Рекомендации..., 2013], эти виды являются устойчивыми к северным климатическим условиям и антропогенной нагрузке.

Методы исследования

Биометрический анализ. Отбор образцов растительного материала для определения биомассы растений производился в конце июля, августа и сентября, для химического анализа – в сентябре 2011 г. методом монолитов [Красильников, 1983]. При этом учитывалась свежая и сухая масса подземных и надземных частей растений с последующим пересчетом полученных данных на единицу площади.

Пробоотбор и пробоподготовка. Пробы грунта отбирались с разных горизонтов (0–5, 5–10 и 10–15 см). Образцы высушивались до воздушно-сухого состояния и просеивались через сито с размером ячеек 1 мм, остатки растительности и камни удалялись [Аринушкина, 1970]. Растительные образцы (надземные органы растений), взятые для химического анализа, высушивались до воздушно-сухого состояния [Минеев и др., 2001]. Часть собранного растительного материала была отмыта в воде для последующего определения содержания химических элементов с учетом и без учета поверхностного загрязнения [Kozlov et al., 2000].

Методы химического анализа. Определение актуальной кислотности (рН) грунта проводилось в водной вытяжке с помощью иономера И-160 М по стандартной методике [Аринушкина, 1970]. Валовое содержание элементов в грунте определяли из навески 0,5 г с использованием смеси концентрированных плавиковой, азотной и соляной кислот после автоклавного микроволнового разложения в системе SW4 с автоклавами DAK100 (Berghof).

Определение доступных форм элементов питания и поллютантов в грунте и мелиоранте проводилось в аммонийно-ацетатном буфер-

ном растворе (рН = 4,65) по стандартной методике [Руководящий..., 1990], определение доступных форм фосфора – по методу Ватанабэ после экстракции в аммонийно-ацетатном буфере. Для оценки содержания азота в растениях применяли метод Кьельдаля [Аринушкина, 1970]. Элементный анализ почвы и растений после перевода в раствор выполнялся на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN-9000 DRC-e (Perkin Elmer) и атомно-абсорбционных спектрометрах «Квант-2А» («Кортек») и AAnalyst 400 (Perkin Elmer).

Математическая обработка данных осуществлялась с помощью средств описательной статистики в программной среде Microsoft Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Исходное состояние грунта

В пределах экспериментального участка отмечено превышение ПДК подвижных форм на 2 порядка по Cu и на 3 порядка по Ni (см. табл. 1) [ГН 2.1.7.2041-06]. Региональные условно-фоновые концентрации в почве [Environmental..., 1998], как и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) [ГН 2.1.7.2511-09] по валовому содержанию указанных металлов, также существенно превышены.

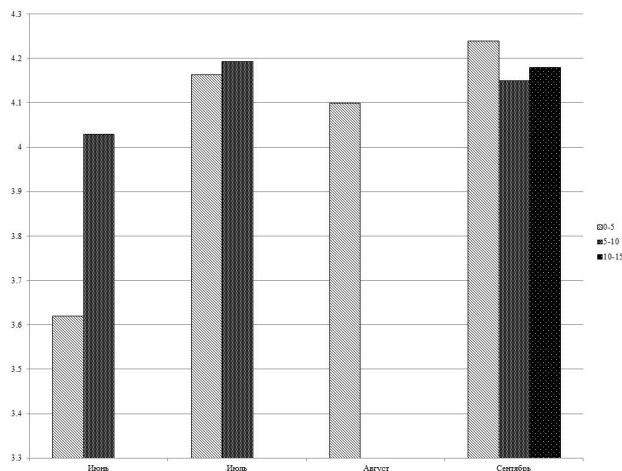
Отмечены различия в распределении ТМ в зависимости от глубины грунта: если распределение доступных форм Cu в пределах верхних 10 см грунта равномерное, то для Ni наблюдается снижение содержания по глубине (по валовому содержанию – более чем в 4 раза). При этом доля доступных форм меди по отношению к валовому содержанию меньше, чем никеля. Отмеченные тенденции связаны с большей подвижностью соединений меди в почвах, подверженных промышленному загрязнению [Проблемы..., 2005].

Исходный грунт имел низкий питательный статус по всем основным элементам питания, при этом характер распределения элементов по глубине различался. Так, содержание доступных форм фосфора в верхнем слое грунта (3 мг/кг) в 10 раз больше, чем в остальной толще, а для калия характерно равномерное распределение (около 35 мг/кг) по всем исследованным слоям грунта (см. табл. 2). Ca и Mg имели сходный характер распределения: их содержание возрастало по мере удаления от поверхности, при этом концентрация доступных форм кальция была в 7–10 раз больше, чем магния.

Учитывая поставленные задачи исследования и то обстоятельство, что на фоновых территориях злаковые сообщества представлены фрагментарно, дополнительную оценку качества исходного грунта осуществляли путем сравнения с составом почв под естественно произрастающими злаковыми сообществами, четко выделяющимися на значительном расстоянии от источника загрязнения (31 км), что обусловлено выраженной техногенной трансформацией природных растительных комплексов на более близких расстояниях. Выявлен существенный дефицит всех определяемых макроэлементов в исходном грунте по сравнению с указанной территорией: по Са в 2–2,5 раза, Mg – в 2–3 раза, К – в 20 раз, Р – в 60–600 раз. Следовательно, исходный грунт может быть признан крайне неблагоприятным и проблематичным для проведения рекультивации.

Актуальная кислотность (pH) грунта в течение вегетационного сезона

В течение вегетационного сезона ежемесячно проводилось измерение показателя pH грунта на различной глубине. Полученные результаты приведены на рисунке.



Зависимость pH исходного грунта от глубины и времени отбора пробы

В указанный период происходило увеличение pH верхнего слоя грунта (на 0,8). При этом наибольшее увеличение отмечено в июне, в то время как в последующие месяцы pH грунта по глубине практически не различался. Возможно, это связано с таянием снега и попаданием накопившейся за зиму серы в виде сульфатов на поверхность грунта. В дальнейшем происходила миграция подкисляющих грунт соединений, что сказалось на уменьшении его кислотности по сравнению с июнем.

Оптимальным условием для нормального развития травянистых растений является pH грунта в диапазоне 6,1–7,4 [Ягодин и др., 2004]. Поскольку процесс растворения мелиоранта происходил достаточно медленно, то уровень pH в слабокислом диапазоне наблюдался лишь к сентябрю в верхнем слое грунта под мелиорантом (pH = 5,7) (табл. 3). Таким образом, в течение вегетационного периода значение pH грунта под мелиорантом увеличилось на 1,5 единицы, что является существенным благоприятным фактором для дальнейшего формирования корнеобитаемого слоя в грунте.

Таблица 3. Динамика актуальной кислотности (pH) в течение вегетационного периода

Месяц	Субстрат	Глубина, см	pH _{водн.}
Июнь	Грунт	0–5	3,6
		5–10	4,0
Июль	Грунт	0–5	4,2
		5–10	4,2
	Мелиорант	0–5	4,4
Август	Грунт	0–5	4,1
	Мелиорант	0–5	4,3
Сентябрь	Грунт	0–5	4,2
		5–10	4,2
		10–15	4,2
	Мелиорант	0–5	5,7
		5–10	4,1
		10–15	4,2

Состояние грунта под слоем мелиоранта в конце вегетационного периода

Результаты, полученные при изучении содержания доступных форм основных элементов питания в грунте, отобранном в конце вегетационного периода 2011 г., приведены в таблице 2. Их анализ показал, что содержание Са, Mg, К, Р менялось по мере удаления от поверхности соприкосновения с мелиорантом и корнеобитаемым слоем грунта. При этом не отмечено общей закономерности в их распределении по глубине взятия пробы. Максимальные концентрации Р и Са приходились на верхний 5-сантиметровый слой, далее в слое 5–10 см происходило снижение, а затем (10–15 см) – увеличение их содержания. Концентрации К и Mg постепенно возрастали по мере удаления от поверхности, что особенно ярко было выражено в отношении Mg.

Известно, что при значительном превышении содержания в почве Са над Mg нарушается развитие корневой системы растения, поэтому рекомендуется поддерживать отношение доступных форм Са:Mg на уровне не ниже 4 [Агрохимия..., 1967]. Превышение содержания доступных форм Са над Mg как в исходном грунте (в 6,5–10 раз), так и в грунте после

внесения мелиоранта (в 2,5–6 раз) свидетельствует о благоприятном статусе формирующегося насыпного грунта с точки зрения баланса указанных макроэлементов.

В грунте под мелиорантом увеличилось содержание К, несмотря на его относительно невысокое содержание в доступной форме непосредственно в самом мелиоранте. Это может быть связано как с поступлением макроэлемента из карбонатитовых отходов, так и с внесением его в составе комплексного минерального удобрения (60 г/м²), осуществленным в середине вегетационного периода. Весьма вероятно также положительное влияние вермикулитового слоя на повышение содержания доступной формы К.

Содержание Р в верхнем слое грунта под мелиорантом в 8 раз превысило его содержание в исходном грунте. Сформированный насыпной грунт можно отнести к грунтам с достаточной обеспеченностью фосфором [Агрохимия..., 1967], в то время как контрольный грунт обеднен данным макроэлементом, как и другие почвы высоких широт [Кашулина, Салтан, 2008].

Состояние растительного покрова в течение вегетации

Семена в контрольном варианте опыта взошли лишь на 5 % площади. Растения в данных условиях оказались нежизнеспособными и погибли в течение вегетационного сезона, что подтвердило приведенные выше аргументы относительно слабой пригодности грунта техногенной пустоши к биологическому освоению.

Травяной покров в вариантах с внесением мелиоранта развивался в течение вегетационного периода за счет образования новых побегов при кущении. Несколько меньшее значение проективного покрытия в варианте 2 связано с высыханием части травостоя после укладки рулонной дернины из-за ее недостаточной увлажненности на этом этапе, однако в течение последующих двух месяцев произошло почти полное восстановление растительного покрова. Проективное покрытие в конце сентября составляло 90–98 % (табл. 4).

Результаты исследования состояния растительного покрова на участках с применением мелиоранта свидетельствуют об активном накоплении биомассы в течение вегетационного периода в обоих вариантах. Результаты оценки накопления биомассы подземных и наземных органов приведены в таблице 5.

Таблица 4. Динамика проективного покрытия в течение вегетационного периода

Вариант опыта	Проективное покрытие, %	
	июль	сентябрь
1	81 ± 21,7	98 ± 5,0
2	51 ± 17,5	90 ± 7,1

Таблица 5. Накопление биомассы надземными и подземными органами растений в течение вегетационного периода

Месяц	Вариант опыта	Биомасса растений в воздушно-сухом состоянии, г/м ²		Отношение массы надземной и подземной частей
		надземная часть	подземная часть	
Июль	1	202 ± 65	177 ± 31	1,1
Август	1	563 ± 249	263 ± 154	2,1
Сентябрь	1	642 ± 64	925 ± 342	0,7
	2	845 ± 151	918 ± 397	0,9

Примечание. Вариант опыта 1 – прямой посев; 2 – интродукция ковровой дернины.

К концу вегетации биомасса подземных органов в обоих вариантах опыта являлась соизмеримой величиной, а надземных – была почти на 30 % выше в варианте 2 (посадка дернины). В динамике этот процесс был исследован при прямом посеве (вариант 1). Отмечено, что отношение массы надземных и подземных органов в начале вегетации составляло 1,1, в середине сезона рост надземных органов усилился, и их масса почти в 2 раза превысила массу подземных органов (отношение 2,1). В конце вегетации отношение сдвинулось в сторону корневой системы и составило 0,7, что может свидетельствовать об оттоке питательных веществ в корни при подготовке травостоя к зимним условиям. Аналогичная тенденция отмечена и во втором варианте опыта: отношение надземной и подземной биомассы в конце вегетационного периода не превысило 1.

Результаты валового анализа растительного материала представлены в таблице 6. Сопоставление полученных результатов проводили относительно средних результатов валового анализа злаковых растений (*Avenella flexuosa* L.), отобранных на фоновых территориях, а также в жизнеспособных злаковых сообществах вблизи опытных участков (7 км по юго-западному градиенту от источника выбросов). Данные получены в ходе многолетних мониторинговых исследований, проводимых ИППЭС КНЦ РАН.

Полученные нами результаты свидетельствуют о соответствии содержания Р в сформированном в ходе опытов травостое минимально допустимому уровню для поддержания его жизнеспособности, а по N, К, Са и Mg – о превышении этого уровня.

Содержание Са в отмытом растительном материале в обоих вариантах варьировало в пределах 140 мг/кг, что составляло 2,7 % от содержания его в исходном (необработанном) материале и 70 % от среднего содержания данного элемента в растениях (табл. 6) [Якушкина, Бахтенко, 2012]. Кальций и магний в виде окислов содержатся в пыли металлургических предприятий. Благодаря этому происходит подщелачивание почв, расположенных вблизи источника загрязнения, и накопление обменных кальция и магния в грунтах техногенной пустоши [Евдокимова, 1994]. По-видимому, большое количество кальция на поверхности растений связано с его антропогенным поступлением вследствие близости места произрастания к источнику выбросов предприятия цветной металлургии. Содержание Mg в неотмытом растительном материале составляло 2000 мг/кг, что незначительно (в 1,2 раза) превышает его среднее содержание в растениях [Якушкина, Бахтенко, 2012].

Фосфор в составе проб, отобранных из созданного травостоя, находился на уровне 600–1000 мг/кг, что в 2 раза меньше среднего содержания в растениях фоновых территорий умеренных широт [Якушкина, Бахтенко, 2012], но согласуется с данными, полученными в ходе исследований различных групп растений в условиях промышленного загрязнения на Кольском полуострове (700–1200 мг/кг) [Кашулина, Салтан, 2008]. Содержание фосфора в растениях, по-видимому, является нормальным для данных условий произрастания. Карбонатитовые отходы характеризуются относительно высоким пулом доступного для растений фосфора, что благоприятно для дальнейшего развития растительного сообщества.

Таблица 6. Содержание элементов (мг/кг) в растительном материале

Элемент	Вариант опыта				<i>Avenella flexuosa</i> L.	
	прямой посев		ковровая дернина		расстояние*, км	
	неотмытый	отмытый	неотмытый	отмытый	31	7
N	15942 ± 3148	–	17688 ± 925	–	11330	–
P	608	–	1022	–	1660	690
K	17286	671	20556	703	12290	11490
Ca	5388	141	4942	138	1700	670
Mg	1947	–	2015	–	650	660
Cu	278	179	204	189	3,9	170
Ni	316	152	242	180	2,3	360

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных. *Указано расстояние от места произрастания *Avenella flexuosa* L. до медно-никелевого предприятия ОАО «Кольская ГМК».

Содержание К в отмытом растительном материале составляло 700 мг/кг, что указывает на его возможный дефицит, если ориентироваться на фоновые значения [Ягодин и др., 2004; Якушкина, Бахтенко, 2012]. Однако нельзя исключать возможность выщелачивания большой доли К при пробоподготовке (промывке поверхности) как одного из наиболее мобильных элементов растительной клетки. Содержание калия в неотмытом растительном материале составляло 17–20 г/кг, что несколько выше, чем приведено в опубликованных результатах исследований на близлежащих территориях, но по другим группам растений [Кашулина, Салтан, 2008].

Содержание N в растениях составляло 1,6–1,8 %, что соответствует средней потребности растений в этом физиологически важном элементе [Якушкина, Бахтенко, 2012] и даже превышает отмеченные фоновые значения.

В растительном материале с опытных участков содержание Ni в неотмытом растительном материале составляло 240–320 мг/кг, в отмытом – 150–180 мг/кг, т. е. наблюдалось существенное загрязнение поверхности растений Ni и его возможная аккумуляция надземными частями растений (см. табл. 6). Полученные нами результаты согласуются с данными других авторов [Кашулина, Салтан, 2008] по содержанию Ni в растениях на близлежащей территории и значительно превышают значения, полученные для трав на незагрязненных территориях (0,4–1,7 мг/кг) [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. Несмотря на то что токсичные концентрации никеля определены на уровне 40–250 мг/кг, в первый год эксперимента визуально не отмечалось признаков хлороза, повреждения корней и других признаков токсического действия поллютанта [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. Предполагается, что оно в значительной степени компенсируется действием мелиоранта, который оказывает благоприятное воздействие на корнеобитаемый слой, вызывая увеличение pH и уменьшение подвижности тяжелых металлов.

Содержание Cu в отмытом растительном материале составляло 180–190 мг/кг, а в неотмытом – 200–280 мг/кг. Таким образом, в отношении Cu также наблюдается увеличение адсорбции соединений элемента на поверхности надземных органов растения и, возможно, их аккумуляция. Накопление поллютанта отмечено в обоих вариантах, но в первом варианте получены более высокие значения (разница до 30 %). Это может быть связано с тем, что растения варианта 2 (с интродукцией ковровой дернины) были на две недели позже размещены на за-

грязненной территории, либо с их более высокой устойчивостью к поверхностному загрязнению, что требует дальнейших исследований.

Сравнение состава растений, выращенных в разных вариантах опыта, показало, что содержание в них N, Ca и Mg практически соизмеримо, а P и K несколько выше в растениях варианта 2 (посадки дерниной). Поскольку в этом же варианте наблюдается и большее накопление биомассы, можно предположить, что данный вариант формирования растительного покрова может быть признан более благоприятным для дальнейшего произрастания растений.

Выводы

1. Использование мелиоранта на основе карбонатных отходов на территории техногенной пустоши с продолжающимся аэротехногенным воздействием способствует оптимизации значений pH грунта и снижению подвижности тяжелых металлов, обладает пролонгированным действием на питательный режим формирующегося почвоподобного субстрата из-за исходно высокого пула Ca, Mg, P.

2. Состояние созданного растительного покрова на участках с применением мелиоранта существенно отличается от контрольного и может быть признано удовлетворительным для начального этапа процессов его восстановления.

3. Дефицит основных элементов питания (K, Ca, Mg, N, P) в растительном покрове не отмечен, но в отношении P требуется регулярный контроль с возможным принятием компенсационных мер для предотвращения дефицита.

4. Интродукция ковровой дернины как способ создания растительного покрова в условиях продолжающейся аэротехногенной нагрузки предпочтительней прямого посева семян травосмеси на слой мелиоранта.

Авторы выражают глубокую благодарность к. т. н. И. П. Кременецкой за предоставление мелиоранта и всестороннюю помощь в организации и проведении исследований, вед. технолог О. П. Корытной за помощь в отборе, подготовке и проведении анализов проб грунта и растений, вед. технолог Г. Н. Андреевой за проведение аналитических работ с пробами грунта и мелиоранта.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы РФФИ 12-04-31234.

Литература

Агрехимия / Под ред. В. М. Ключковского, А. В. Петербургского. М.: Колос, 1967. 584 с.

Андроханов В. А. Современные проблемы восстановления техногенно нарушенных территорий: материалы докладов VI съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева. Всероссийская с международным участием научная конференция «Почвы России: современное состояние, перспективы изучения использования» (Петрозаводск–Москва, 13–18 августа 2012 г.). Петрозаводск: КарНЦРАН, 2012. Кн. 3. С. 518–520.

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.

Беляева Т. В., Веленгицин А. А., Калюкина С. А. Отчет о разведке отходов (хвостов обогащения магнетитовых и апатитовых руд Ковдорского месторождения, заскладированных на 2-м поле хвостохранилища) ОАО «Ковдорский ГОК»; 1-й этап 2006–2009 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2008 г. Апатиты, фонды ОАО МГРЭ, 2009.

Виноградов А. П. Среднее содержание элементов в земной коре // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–557.

Ганичева С. Н., Лукина Н. В., Костина В. А., Никонов В. В. Техногенная дигрессия и восстановительная сукцессия в хвойных лесах Кольского полуострова // Лесоведение, 2004. № 3. С. 57–67.

ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве».

ГН 2.1.7.2511-09 «Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве».

Евдокимова Г. А. Эколого-биологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты, 1994. 272 с.

Иванова Л. А., Костина В. А., Кременецкая М. В., Иноземцева Е. С. Ускоренное формирование противозерозионных травостоев на техногенно нарушенных территориях: Заполярье // Вестник МГТУ, т. 13. 2010. № 4/2. С. 977–983.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Кашулина Г. М., Салтан Н. В. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель». Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. 239 с.

Красильников П. В. Методика полевого изучения подземных частей растений. Л.: Наука, 1983. 208 с.

Кременецкая И. П., Лашук В. В., Волочковская Е. Ю., Дрогобужская С. В., Морозова Т. А. Применение магнезиально-силикатного реагента для очистки от тяжелых металлов природно-антропогенных водных источников, расположенных в зоне воздействия ОАО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) // Цветные металлы. 2012. № 7. С. 35–40.

Куликов Ю. А. Некоторые экологические аспекты использования мелиорантов для оптимизации эдафической среды: материалы международной конференции «Актуальные вопросы экологической физиологии растений в 21 веке», г. Сыктывкар, 2001 г. 435 с.

Лашук В. В., Суворова О. В., Макаров Д. В., Бокарева В. А. Исследование отходов обогащения руд горнопромышленного комплекса Мурманской области в качестве термохимического сырья для про-

изводства стекла и керамики // Труды VIII Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 135-летию со дня рождения акад. Д. С. Белянкина «Минералогия, петрология и полезные ископаемые Кольского региона». Апатиты, 18–19 апреля 2011 г. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. С. 259–264.

Минеев В. Г., Сычев В. Г., Амеляничик О. А., Большеева Т. Н., Гомонова Н. Ф., Дурынина Е. П., Егоров В. С., Егорова Е. В., Едемская Н. Л., Карпова Е. А., Прижукова В. Г. Практикум по агрохимии. 2-е изд.: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

Мониторинг окружающей среды в зоне влияния ОАО «Кольская ГМК» и рекультивация нарушенных земель // Электрон. презентация, 2010. URL: <http://www.kolagmk.ru/ecology/monitoring> (дата обращения: 12.10.2012).

Патент РФ № 2393665, 20.01.2009. Иванова Л. А., Котельников В. А. Способ создания экологически чистого покрытия и питательная среда для его выращивания // Патент России № 2393665, 2009. Бюл. № 2.

Проблемы экологии растительных сообществ Севера / Отв. ред. В. Т. Ярмишко. СПб.: ООО «ВВМ», 2005. 450 с.

Рекомендации для рекультивации земель // АПК «Витус», 2012. URL: <http://www.vitusltd.ru/rec-ks.html> (дата обращения: 10.03.2013).

Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 52.18.289-90. Гос. комитет СССР по гидрометеорологии. Москва, 1990.

Рухин Л. Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах. Изд. 3-е. Л.: Недра, 1969. 704 с.

Святковская Е. А. Технология создания и содержания цветников и газонов в условиях Мурманской области. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2000. 27 с.

Тамберг Т. Г. Газонные травы для Мурманской области, их биология и агротехника / Декоративные растения в озеленении Крайнего Севера. Л.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 19–59.

Ягодин Б. А., Жуков Ю. П., Кобзаренко В. И. Агрохимия. М.: Колос, 2004. 584 с.

Якушкина Н. И., Бахтенко Е. Ю. Онлайн-энциклопедия по физиологии растений. URL: <http://fizrast.ru> (дата обращения: 12.10.2012).

Alburquerque J. A., de la Fuente C., Bernal M. P. Improvement of soil quality after “alperujo” compost

application to two contaminated soils characterised by differing heavy metal solubility // Journal of Environmental Management 92 (2011). P. 733–741.

Bradshaw A. Restoration of mined lands—using natural processes // Ecological Engineering 8 (1997). P. 255–269.

Environmental geochemical atlas of the central Barents region. 1998. Reimann C., Ayräs M., Chekushin V., Bogatyrev I., Boyd R., Caritat P., Dutter R., Finne T. E., Halleraker J. H., Jaeger Ø., Kashulina G., Lehto O., Niskavaara H., Pavlov V., Räisänen M. L., Strand T., Volden T. Geol Surv. Norway, Trondheim.

Farrell Mark, Jones Davey L. Use of composts in the remediation of heavy metal contaminated soil // Journal of Hazardous Materials 175 (2010). P. 575–582.

International Application No.:PCT/RU2010/000001 / International Filing Date: 11.01.2010. Kotelnikov V. A., Ivanova L. A. (en) Method for biologically recultivating industrial wastelands. (fr) Procédé de remise en culture biologique de terres appauvries sur le plan technogène. (ru) Способ биологической рекультивации техногенно нарушенных земель // Pub. No.: WO/2011/084079. International Application No.:PCT/RU2010/000001. Publication Date: 14.07.2011. International Filing Date: 11.01.2010. IPC: A01B 79/02 (2006.01), A01G 1/00 (2006.01), A01G 31/00 (2006.01).

Kozlov M. V., Haukioja E., Bakhtiarov A. V., Stroganov D. N., Zimina S. N. Root versus canopy uptake of heavy metals by birch in an industrially polluted area: contrasting behaviour of nickel and copper // Environmental Pollution. Vol. 107. Is. 3. March 2000. P. 413–420.

Kozlov M. V., Zvereva E. L. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. (2007) 6:231–259.

Park Jin Hee, Lamb Dane, Paneerselvam Periyasamy, Choppala Girish, Bolan Nanthi, Chung Jae-Woo. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils // Journal of Hazardous Materials 185 (2011). P. 549–574.

Remon E., Bouchardon J.-L., Cornier B., Guy B., Leclerc J.-C., Faure O. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration // Environmental Pollution 137 (2005). P. 316–323.

Vangronsveld J. F., Van Assche, H. Clijsters. Reclamation of bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: in situ metal immobilization and revegetation // Env. Pollution 87 (1995). P. 51–59.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Слуковская Марина Вячеславовна

аспирант
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185000
эл. почта: krem.mv@gmail.com
тел.: 89095722478

Slukovskaya, Marina

Petrozavodsk State University
33 Lenina St., 185000 Petrozavodsk, Karelia,
Russia
e-mail: krem.mv@gmail.com
tel.: 89095722478

Иванова Любовь Андреевна

зав. лаб., старший научный сотрудник, к. б. н.
Полярно-альпийский ботанический сад-институт
им. Н. А. Аврорина
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 18а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: ivanova_la@inbox.ru

Горбачева Тамара Тимофеевна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: gorbacheva@inep.ksc.ru

Дрогобужская Светлана Витальевна

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт химии и технологии редких элементов и
минерального сырья им. И. В. Тананаева
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 26а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: drogo_sv@chemy.kolasc.net.ru

Иноземцева Елена Станиславовна

старший лаборант-исследователь
Полярно-альпийский ботанический сад-институт
им. Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 18а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: inozemceva05@mail.ru

Марковская Евгения Федоровна

зав. кафедрой, д. б. н., проф.
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185000
эл. почта: volev@sampo.ru

Ivanova, Liubov

Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Center,
Russian Academy of Sciences
18a Academgorodok, 184209 Apatity, Murmansk reg.,
Russia
e-mail: ivanova_la@inbox.ru

Gorbacheva, Tamara

Institute of the Industrial Ecology Problems of the North,
Kola Science Center, Russian Academy of Sciences
14a Academgorodok, 184209 Apatity, Murmansk reg., Russia
e-mail: gorbacheva@inep.ksc.ru

Drogobuzhskaya, Svetlana

Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and
Mineral Raw Materials, Kola Science Center,
Russian Academy of Sciences
26a Academgorodok, 184209 Murmansk reg., Russia
e-mail: drogo_sv@chemy.kolasc.net.ru

Inozemtseva, Elena

Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Center,
Russian Academy of Sciences
18a Academgorodok, 184209 Apatity, Murmansk reg., Russia
e-mail: inozemceva05@mail.ru

Markovskaya, Evgenia

Petrozavodsk State University
33 Lenina St., 185000 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: volev@sampo.ru