ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕХНОГЕННЫХ ПУСТОШАХ В ОКРЕСТНОСТЯХ МОНЧЕГОРСКА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ)¹

В. Н. Коротков

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля, Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б
E-mail: korotkovv@list.ru

Г. Н. Копцик

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1
E-mail: koptsikg@mail.ru

И. Е. Смирнова

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1
E-mail: koptsikg@mail.ru

С. В. Копцик

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1
E-mail: koptsikg@mail.ru

RESTORATION OF VEGETATION ON MINE LANDS NEAR MONCHEGORSK (MURMANSK REGION, RUSSIA)

V. N. Korotkov

Yu. A. Israel Institute of Global Climate and Ecology, 20B Glebovskaya st., Moscow, 107258, Russia
E-mail: korotkovv@list.ru

G. N. Koptsik

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: koptsikg@mail.ru

I. E. Smirnova

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: koptsikg@mail.ru

S. V. Koptsik

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: koptsikg@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Возрастающее техногенное загрязнение требует восстановления растительного покрова во многих индустриальных регионах планеты, включая окрестности предприятий цветной металлургии в Кольской Субарктике. Подзолы и абраземы техногенных пустошей крайне неблагоприятны для развития растений. Цель работы – оценка восстановления растительности после ремедиации техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель». **Материалы и методы.** Ремедиация проводилась в 2003–2008 гг. двумя методами: хемофитостабилизации (без предварительной обработки почв) и перекрытия загрязненных почв сконструированным плодородным слоем с последующими известкованием, удобрением, высадкой саженцев и травяно-злаковой смеси. Видовой состав и проективное покрытие растительности, жизненное состояние подроста, надземную фитомассу напочвенного покрова, мощность верхнего слоя почв оценивали на 11 участках мониторинга с учетом пространственного варьирования. Участки техногенных пустошей рассматривались в качестве контрольных. Для анализа и графического отображения характерных особенностей изменчивости растительности использовали метод главных компонент. **Результаты.** Участки хемофитостабилизации слабо отличаются от техногенных пустошей по состоянию растительности из-за неблагоприятных эдафических условий. Высаженные деревья и кустарники имеют сильно угнетенный вид и низкое проективное покрытие, напочвенный покров не восстанавливается. На участках ремедиации с нане-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-04-01028.

сенным плодородным слоем формируются разреженные лиственные молодняки с преобладанием ивы козьей и/или березы пушистой, более высоким уровнем жизненности деревьев и видовым разнообразием, травяным покровом с участием злаков и/или хвоща лугового. Анализ главных компонент выявил объективное разделение участков по состоянию растительности в зависимости от технологии ремедиации. Выводы. Успешное восстановление растительности на техногенных территориях при сокращении выбросов зависит от состояния почв и применяемой технологии. Экологически благоприятная и экономически выгодная хемофитостабилизация дает краткосрочный эффект, нуждающийся в непрерывном поддержании. Более перспективным, но дорогостоящим способом быстрого восстановления пустошей является нанесение на поверхность загрязненных почв сконструированного плодородного слоя в сочетании с посадкой лиственных деревьев и посевом многолетних трав.

Ключевые слова: восстановление растительности, ремедиация, хемофитостабилизация, техногенная пустошь, деградация почв.

Для цитирования: Коротков, В. Н. Восстановление растительности на техногенных пустошах в окрестностях Мончегорска (Мурманская область, Россия) / В. Н. Коротков, Г. Н. Копчик, И. Е. Смирнова, С. В. Копчик // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2019. – Vol. 4 (1). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2019-1-4>

Abstract. Background. The increasing technogenic pollution actualizes the restoration of vegetation cover in many industrial regions of the planet, including the vicinity of non-ferrous metallurgy enterprises in the Kola Subarctic. The barrens podzols and abrazemes are unfavorable for plant development. The study is aimed at assessing the restoration of vegetation as a result of the mine lands remediation near the Severonickel industrial complex. **Materials and methods.** Remediation was carried out in 2003–2008 by two methods: chemophytostabilisation (without pretreatment of the soil) and overlapping of contaminated soils with organic matter-rich cover materials followed by liming, fertilization, seedlings planting and grass mixture sowing. The species composition and the projective cover of the vegetation, the vital status of the undergrowth, the aboveground phytomass of the ground cover and the thickness of the upper soil layer were evaluated at 11 monitoring sites taking into account spatial variation. Areas of barren lands were considered as control. For the evaluation and graphical display of the characteristic features of the vegetation variability, the principal component analysis (PCA) was used. **Results.** According to the state of the vegetation, the chemophytostabilisation sites only slightly differ from the control barrens sites due to adverse edaphic conditions. Planted trees and shrubs have a strongly depressed appearance and a low projective cover, and the ground cover is not restored. On remediation sites with organic matter-rich fertile layer, sparse deciduous young stands are formed with a predominance of goat willow and / or fluffy birch, with a higher level of tree vitality and species diversity, grass cover with the participation of grass and / or horse-tail. The PCA revealed an objective fractioning of sites according to the vegetation condition depending on the remediation technology. **Conclusions.** Successful restoration of vegetation in mine lands in conditions of emissions reduction depends on the state of the soil and the technology used. Environmentally friendly and cost-effective chemophytostabilisation gives only a short-term effect that needs continuous maintenance. A more promising but expensive way to quickly restore the barren lands is to apply a constructed fertile layer to the surface of polluted soils in combination with the planting of deciduous trees and the sowing of perennial grasses.

Keywords: restoration of vegetation, remediation, chemophytostabilisation, barren lands, soil degradation.

For citation: Korotkov V.N., Koptsik G.N., Smirnova I.E., Koptsik S.V. Restoration of vegetation on mine lands near Monchegorsk (Murmansk region, Russia). Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2019;4(1). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2019-1-4>

Введение

Возрастающие масштабы техногенного воздействия делают восстановление растительного покрова актуальной задачей во многих промышленных регионах планеты [1]. Среди таких территорий особое место занимают окрестности предприятий цветной металлургии, зачастую представляющие собой техногенные пустыни, практически полностью лишённые растительности [2–4]. Проблема восстановления техногенных пустошей в условиях сильного загрязнения остается до конца нерешенной. Их дальнейшая судьба в значительной степени определяется не только объемами промышлен-

ных выбросов, но и выбранной стратегией и технологией ремедиации в конкретных почвенно-биоклиматических условиях [5–10].

Длительное воздействие атмосферных выбросов диоксида серы и тяжелых металлов привело к деградации растительного и почвенного покрова и формированию техногенных пустошей в радиусе первых километров от комбинатов «Североникель» [11–13] и «Печенганикель» [14–16] на Кольском полуострове. Распространенные в регионе природные иллювиально-гумусовые подзолы в результате потери защитного растительного покрова и интенсивного развития эрозионных процессов утратили верхние органогенный и подзолистый

горизонты и постепенно трансформировались в абраземы альфегумусовые. Характерные свойства таких почв – потери верхних слоев в результате эрозии, обеднение элементами питания и органическим веществом, большие запасы накопленных тяжелых металлов, ослабление биологической активности, жесткий микроклимат, угнетение корневых систем [13, 17]. Несмотря на сокращение выбросов, неблагоприятные свойства почв препятствуют естественному восстановлению растительности, обуславливая необходимость ремедиации. В связи с этим цель работы – сравнительная оценка восстановления растительности в результате применения разных методов ремедиации техногенных пустошей в окрестностях

Мончегорска в зоне влияния комбината «Североникель» (Мурманская область).

Район, объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили посадки ивы и березы на участках ремедиации, а также примыкающие к ним участки техногенных пустошей вблизи промышленной площадки комбината «Североникель», которые рассматривались в качестве контрольных (табл. 1). Почвы представлены иллювиально-железистыми химически загрязненными подзолами, хемоземами, загрязненными Ni и Cu по подзолу, и абраземами альфегумусовыми, развитыми на моренных отложениях в автоморфных позициях рельефа.

Таблица 1

Участки ремедиации и пустошей в окрестностях Мончегорска

Table 1

Remediation sites and barren lands in the vicinity of Monchegorsk

Обозначение участка*	Расстояние от ГМК	Почва	Вариант	Год ремедиации	Метод ремедиации
МП2003/6	2.6	Абразем альфегумусовый иллювиально-железистый супесчаный	Пустошь	–	–
МРН2003	3.3		Посадка березы и ивы	2003	Нанесение слоя
МРН2006	2.5		Посадка березы	2006	
МП2004/5	3.2	Хемозем, загрязненный Cu и Ni по подзолу иллювиально-железистому поверхностно-подзолистому песчаному	Пустошь	–	–
МР2004	3.0		Посадка ивы	2004	Хемофитостабилизация
МРН2004	3.7		Посадка ивы	2004	Нанесение слоя
МРН2005	2.9		Посадка ивы	2005	Нанесение слоя
МП2007/8	5.3		Пустошь	–	–
МР2007	5.0	Подзол иллювиально-железистый химически загрязненный поверхностно-подзолистый супесчаный	Посадка березы	2007	Хемофитостабилизация
МРН2007	4.8		Посадка березы	2008	Нанесение слоя
МРН2008	5.3		Посадка ивы	2008	Нанесение слоя
БМ	5.0		Посадка березы	2003	–

Примечание. * МП – пустоши в окрестностях Мончегорска, МР – участки хемофитостабилизации, МРН – участки ремедиации с нанесенным плодородным слоем, БМ – березовое мелколесье.

Ремедиация техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» была проведена Государственным областным учреждением «Мончегорский лесхоз» (ныне Мончегорское лесничество) по рекомендациям Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН при поддержке Кольской ГМК в 2003–2008 гг. с помощью двух подходов – хемофитостабилизации и нанесения сконструированного плодородного слоя. Хемофитостабилизация включала посадку местных видов лиственных древесно-кустар-

никовых пород (преимущественно ивы козьей (*Salix caprea* L.) и березы (*Betula* spp.) без предварительной подготовки почвы с одновременным посевом многолетних трав и внесением мелиорантов (известии) и минеральных удобрений.

Ремедиация путем нанесения сконструированного плодородного слоя включала в себя создание искусственного органоминерального слоя, перекрытие им загрязненных почв, планировку, высадку древесно-кустарниковых растений и посев трав, внесение удобрений и мелиорантов. На большинстве участков субстрат

состоял из торфа, песка и опилок, местами с добавлением осадка сточных вод (ОСВ). Доза внесения известковой муки на большинстве участков составляла 2 т/га, минеральных удобрений (азофоски) – 1 т/га (сообщение директора Мончегорского лесничества В. Ф. Петручика). Древесно-кустарниковые породы представлены в основном ивами (преимущественно *Salix caprea* с небольшой примесью *S. phylicifolia* L., *S. cinerea* L., *S. glauca* L. и др.) и березами (преимущественно *Betula pubescens* Ehrh., реже – *B. pendula* Roth.), а в состав травосмесей входили различные виды злаков (*Festuca rubra* L., *F. pratensis* Huds., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Но-

lub, *Dactylis glomerata* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski и др.).

В августе 2018 г. были проведены полевые обследования состояния растительности техногенных пустошей, включающие 44 геоботанических описания на 11 участках мониторинга: 3 участка мониторинга охватывали техногенные пустоши (фото 1–3), 2 участка – пустоши, где проводилась хемотростабиллизация и посадка лесных культур (фото 4–6), 6 участков – пустоши, на которых проводилась ремедиация с нанесением плодородного слоя в сочетании с посадкой лесных культур (фото 7–12).

Фото 1. Сохранившийся угнетенный подрост березы на техногенной пустоши (пробная площадь МП2003/6)

Photo 1. Stunted birch tree on barren land (sample plot МП2003/6)

Фото 2. Участок техногенной пустоши, лишенный растительности (пробная площадь МП2004/5)

Photo 2. Area of barren land without vegetation (sample plot МП2004/5)

Фото 3. Участок техногенной пустоши с погибшими деревьями (пробная площадь МП2007/8)

Photo 3. Area of barren land with snags (sample plot МП2007/8)

Фото 4. Участок хемофитостабилизации с низкой сохранностью культур, плохо сохранившимся травяным покровом (пробная площадь МР2004). Разреженный моховой покров представлен *Pohlia nutans*

Photo 4. Area of chemophytostabilisation with low crop preservation, badly preserved grass cover (sample plot МР2004). Thinned moss cover is *Pohlia nutans*

Фото 5. Участок хемофитостабилизации с низкой сохранностью культур (пробная площадь МР2007)

Photo 5. Area of chemophytostabilisation with low crop preservation (sample plot МР2007)

Фото 6. Участок хемофитостабилизации (пробная площадь МР2007)
с *Alnus incana* нормальной жизненности в молодом генеративном состоянии

Photo 5. Area of chemophytostabilisation (sample plot МР2007)
with *Alnus incana* of normal vigour in a young generative state

Фото 7. Участок ремедиации с нанесенным плодородным слоем (пробная площадь MPH2003). Разреженный древостой сформирован многоствольными деревьями *Salix caprea*, в травяном покрове преобладают *Elytrigia repens*, *Equisetum arvense*, *Chamerion angustifolium*, *Deschampsia caespitosa*

Photo 7. Remediation area with deposited fertile layer (sample plot MPH2003). Thinned forest stand is formed by multistem trees *Salix caprea*; *Elytrigia repens*, *Equisetum arvense*, *Chamerion angustifolium*, *Deschampsia caespitosa* prevail in the grass cover

Фото 8. Участок ремедиации с нанесенным плодородным слоем (пробная площадь MPH2004).

В ярусе В доминирует *Salix caprea*, в разреженном травяном покрове – *Deschampsia caespitosa* и *Equisetum arvense*

Photo 8. Remediation area with deposited fertile layer (sample plot MPH2004). *Salix caprea* prevail in story B; *Deschampsia caespitosa* and *Equisetum arvense* – in thinned grass cover

Фото 9. Участок ремедиации с нанесенным плодородным слоем (пробная площадь MPH2005).
В ярусе В преобладает *Salix caprea*, травяной покров плохо сохранился

Photo 9. Remediation area with deposited fertile layer (sample plot MPH2005). *Salix caprea* prevail in story B;
grass cover is badly preserved

Фото 10. Участок ремедиации с нанесенным плодородным слоем (пробная площадь MPH2006)
в непосредственной близости от источника загрязнения. Ярус подроста из *Salix caprea* и *Betula pubescens*
сохранился слабо, в травяном покрове преобладают злаки (*Calamagrostis lapponica*,
C. phragmitoides, *Deschampsia caespitosa*)

Photo 10. Remediation area with deposited fertile layer (sample plot MPH2006) in close vicinity to pollution
source. Understory of *Salix caprea* and *Betula pubescens* is badly preserved, grain varieties
(*Calamagrostis lapponica*, *C. phragmitoides*, *Deschampsia caespitosa*) prevail in grass cover

Фото 11. Участок ремедиации с нанесенным плодородным слоем (пробная площадь MPH2007).
В ярусе В представлены *Salix caprea* и *Betula pubescens*,
в травяном покрове доминирует *Deschampsia caespitosa*

Photo 11. Remediation area with deposited fertile layer (sample plot MPH2007). Story B is composed of *Salix caprea* and *Betula pubescens*; *Deschampsia caespitosa* prevails in grass cover

Фото 12. Участок ремедиации с нанесенным плодородным слоем (пробная площадь MPH2008).
В ярусе В представлены кустовидные формы *Salix caprea*, *Betula pubescens* и *Salix phylicifolia*,
в травяном покрове преобладают *Festuca rubra* и *Deschampsia caespitosa*

Photo 12. Remediation area with deposited fertile layer (sample plot MPH2008). Story B is composed of bushes *Salix caprea*, *Betula pubescens* and *Salix phylicifolia*; *Festuca rubra* and *Deschampsia caespitosa* prevail in grass cover

Геоботанические описания выполнены на площадках 10×10 м по стандартной методике [18]. Были выделены ярус подроста и подлеска (ярус *B*), травяно-кустарничковый ярус (ярус *C*) и мохово-лишайниковый ярус (ярус *D*). Для каждого яруса определялось общее проективное покрытие и средняя высота, а также составлялся список видов с указанием проективного покрытия каждого вида в процентах. Помимо геоботанических описаний был проведен учет подроста деревьев и кустарников по классам высоты и жизненного состояния (нормальные, ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие). Для оценки надземной фитомассы напочвенного покрова были отобраны укусы с площадок 25×25 см.

Для учета пространственной изменчивости все показатели на каждом участке мониторинга определены в 4-кратной повторности. Одновременно измеряли мощность верхнего обогащенного органическим веществом слоя почв в 9-кратной повторности на каждой из четырех площадок участка мониторинга, всего в 36-кратной повторности на каждом участке. Результаты обработаны с помощью описательной статистики.

Для анализа и графического отображения характерных особенностей изменчивости растительности использовали метод главных компонент (ГК), позволяющий аппроксимировать исходные свойства путем разложения их в ряд на основе присущих самим данным структур (собственных векторов), наиболее полно отражающих пространственную изменчивость анализируемых свойств [19, 20]. Получаемое при этом объективное структурирование показателей растительности можно рассматривать как одно из средств системного анализа состояния экосистем при ремедиации. Детали использованной техники анализа изложены ранее [16].

Для анализа были выбраны следующие показатели состояния растительности: проективное покрытие, численность деревьев разного жизненного состояния и надземная фитомасса живого напочвенного покрова. Из них предварительно была выделена группа качественно однородных показателей, для которых и определялись ГК. В пространстве первых ГК исходные данные аппроксимируются суммой произведений сопряженных ГК участков и свойств, а аппроксимированные данные представляются двумя сопряженными диаграммами участков и свойств. Поскольку анализируемые исходные показатели на сильно загрязненных участках обычно имеют нулевые значения, часто используемая логарифмическая трансформация свойств исключается. Поэтому исходные свойства предварительно нормировались на их стандартные отклонения для сопоставимости

величин свойств. Соответственно, ординационные диаграммы характеризуют относительную изменчивость свойств. Расстояние между точками на диаграмме участков характеризует близость участков по совокупности всех аппроксимированных свойств. Косинус угла между стрелками на диаграмме свойств аппроксимирует коэффициент корреляции между свойствами, а длина стрелок показывает, насколько хорошо изменение свойства представлено в пространстве двух первых ГК.

Внешние переменные (т.е. любые другие количественные свойства как растительности, так и окружающей среды, не вошедшие в анализ ГК; пунктирные стрелки) определены как коэффициенты разложения матрицы центрированных нормированных свойств по уже определенному базису ГК и оптимальны в смысле приближения этих свойств ГК. При этом косинус угла между любыми (как основными, так и внешними) переменными на диаграмме свойств аппроксимирует коэффициент корреляции между свойствами, а длина стрелок показывает, насколько хорошо изменение внешних свойств представлено в пространстве двух первых ГК. Представленность внешних свойств должна быть в общем случае хуже, чем основных. Можно сказать, что выбор основных переменных является принципиальным моментом анализа методом ГК; именно он определяет «систему координат», в которой мы анализируем изменчивость всех свойств.

Результаты и их обсуждение

Состояние деревьев. Техногенные пустоши.

В почвенном покрове техногенных пустошей доминируют иллювиально-железистые химически загрязненные подзолы (МП2007/8), хемоземы, загрязненные Ni и Cu по подзолу (МП2004/5), и абраземы альфегумусовые, утратившие верхние органогенный и подзолистый горизонты в силу интенсивного развития эрозионных процессов (МП2003/6). Эти почвы сильнокислые, почти полностью лишены элементов питания, обеднены органическим веществом, загрязнены тяжелыми металлами [13] и не могут обеспечить условия для благополучного существования живых организмов. Интенсивность почвенного дыхания CO_2 (15–30 мг $\text{C} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) крайне низка, а корневое дыхание отсутствует [21].

Как показали исследования, на техногенных пустошах, удаленных на 5–6 км от источника загрязнения, еще сохраняется подрост мелколиственных видов деревьев (преимущественно ивы козьей и березы пушистой) с единичным участием сосны и ели (табл. 2, рис. 1, пробная площадь МП2007/8), тогда как на пустошах,

расположенных вблизи комбината (2–3 км), подрост отсутствует или представлен единичными угнетенными экземплярами березы пушистой или ивы козьей (пробные площади МП2003/6, МП2004/5, см. табл. 2, рис. 1). Эту закономерность подтверждают проведенные ранее исследования [22].

Участки хемофитостабилизации. Хемофитостабилизация техногенных пустошей привела к некоторому улучшению свойств почв – сни-

жению кислотности и обогащению элементами питания. Однако реакция большинства обработанных почв остается сильнокислой, а содержание доступных Са, Mg, K, P и Zn гораздо ниже фонового уровня. Большинство обработанных почв содержит не меньше доступных соединений Ni и Cu, чем их необработанные аналоги [13]. Почвенное дыхание заторможено ($20\text{--}40 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ [21]).

Таблица 2

Характеристика подроста на техногенных пустошах в окрестностях Мончегорска

Table 2

Characteristic of undergrowth on technogenic barrens in the vicinity of Monchegorsk

Шифр пробной площади	Формула состава*	Число особей на 1 га	Средняя высота подроста ± ошибка среднего, м				
			Береза пушистая	Ива козья	Ива филико-листная	Ольха серая	Сосна
Контрольные участки пустошей							
МП2003/6	10Б	25	0,7	–		–	
МП2004/5	10И	25	–	1,8		–	
МП2007/8	5Б 3С 2И	650	1,45±0,16	1,04±0,13		–	1,42±0,38
Участки хемофитостабилизации							
МР2004	5И 1Б+С	725	0,48±0,04	0,29±0,06			1,1
МР2007	9Б 1О+И	1550	0,60±0,05	0,63±0,04		1,75±0,29	
Участки ремедиации с нанесенным плодородным слоем							
МРН2003	9И 1Б 1Иф	925	3,32±0,93	4,71±0,28	2,27±0,79		
МРН2004	9И 1Иф	1975	–	2,06±0,09	0,83±0,22		
МРН2005	8И 1Б 1Иф	2225	1,01±0,19	1,85±0,12	0,86±0,11		
МРН2006	6Б 3И 1Иф	1475	1,41±0,16	0,96±0,25	1,06±0,23		
МРН2007	7Б 2И 2Иф	2000	1,28±0,06	0,92±0,09	0,71±0,11		
МРН2008	9И 3Иф 1Б	1750	0,87±0,15	0,74±0,05	0,53±0,06		

Примечание. * Б – береза пушистая, И – ива козья, Иф – ива филиколистная, С – сосна обыкновенная, О – ольха серая.

Рис. 1. Жизненное состояние и численность подроста деревьев на участках ремедиации с нанесенным плодородным слоем (МРН), хемофитостабилизации (МР) и на техногенных пустошах (МП)

Fig. 1. The vital status and the number of undergrowth of trees in the remediation sites amended with organic matter–rich fertile cover materials (MRN), chemophytostabilisation sites (MR) and technogenic barren sites (MP)

Участки хемофитостабилизации слабо отличаются от техногенных пустошей по состоянию высаженных деревьев и кустарников. Хотя количество подроста на единицу площади на этих участках больше, чем на техногенных пустошах, большая часть высаженных деревьев *Salix caprea* и *Betula pubescens* относится к категории сильно ослабленных и усыхающих (см. табл. 2, рис. 1). Подрост имеет кустовидную форму в результате отмирания лидерной оси и появления боковых побегов из спящих почек в основании ствола. На участке МР2007 была высажена *Alnus incana*, которая отличается нормальной жизненностью и почти в 3 раза превышает по высоте иву и березу (см. табл. 2). Это может свидетельствовать о перспективности использования этого вида, обладающего симбиотической азотфиксацией, для восстановления пустошей.

Участки ремедиации с нанесенным плодородным слоем. Перекрытие загрязненных почв искусственно созданным плодородным слоем на основе органоминеральных субстратов с последующим известкованием и удобрением способствует быстрому и долговременному снижению кислотности, обогащению органическим веществом и элементами минерального питания (N, P, K, Ca, Mg, Mn и Zn), уменьшению биологической доступности тяжелых металлов [13]. Однако в условиях продолжающегося атмосферного загрязнения поверхностные слои половины обработанных почв накапливают Ni и особенно Cu. Эффективность ремедиации зависит от состава и мощности сконструированного слоя и сопутствующих мероприятий. Наиболее плодородной оказалась почва с мощным насыпным слоем, состоящим из осадка сточных вод, опилок и песка. Улучшение свойств почв в результате ремедиации способствует резкому росту биологической активности и интенсификации дыхания почв ($50\text{--}110 \text{ мг } \text{C} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). Судя об эффективности ремедиации по таким показателям биологической активности, как дыхание почвы, доля корневого дыхания и микробная биомасса, можно заключить, что успешное восстановление почв достигается только при перекрытии загрязненных почв искусственно созданным плодородным слоем [21].

На участках ремедиации с нанесенным плодородным слоем отмечено формирование разреженных листовых молодых с преобладанием ивы козьей и/или березы пушистой, которые сформировались из высаженных лесных культур. Количество подроста на единицу площади варьирует от 0,9 до 2,2 тысяч особей на 1 га. Подавляющее большинство высаженных деревьев имеет кустовидную форму. Деревья на участках ремедиации имеют более высокий

уровень жизненности, чем на пустошах и участках хемофитостабилизации (см. табл. 1, рис. 1). Наибольшую высоту имеют деревья ивы козьей на участках МРН2003 и МРН2004, что, вероятно, связано с более благоприятными эдафическими условиями и большим возрастом культур по сравнению с другими участками ремедиации.

Видовое разнообразие и состояние живого напочвенного покрова. *Техногенные пустоши.* Как показали исследования, на техногенных пустошах, удаленных на 4–5 км от источника загрязнения, видовая насыщенность составляет 1–5 видов на 100 м^2 (в среднем $3,8 \pm 0,9$ видов на 100 м^2 ; рис. 2, пробная площадь МП2007/8), включая виды деревьев, тогда как пустоши вблизи комбината (2–3 км) практически полностью лишены растительного покрова, проективное покрытие которого не превышает 0,1–0,5 % (рис. 3). Травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы отсутствуют. Видовая насыщенность составляет 0–2 вида растений на 100 м^2 . В среднем видовая насыщенность не превышает $1,3 \pm 0,3$ вида на 100 м^2 (см. рис. 2, пробная площадь МП2004/5). Из деревьев встречаются ива козья или береза пушистая, из кустарничков – угнетенные растения *Empetrum hermaphroditum* Hagerup, *Vaccinium vitis-idaea* L., *V. uliginosum* L. Из мхов встречается только один вид – *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb., проективное покрытие которого составляет менее 1 %. Фитомасса напочвенного покрова близка к нулю.

Участки хемофитостабилизации слабо отличаются от техногенных пустошей по состоянию растительности. Высаженные деревья и кустарники имеют сильно угнетенный вид и низкое проективное покрытие (1–2 %), а травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы не восстанавливаются (см. рис. 3). Видовая насыщенность варьирует от 5 до 10 видов сосудистых растений на 100 м^2 . Среднее значение видовой насыщенности составляет от $6,3 \pm 0,8$ видов на 100 м^2 на пробной площади МР2004/1 до $9,3 \pm 0,5$ видов на 100 м^2 на пробной площади МР2007 (см. рис. 2). Увеличение видового разнообразия связано с посадкой лесных культур *Salix caprea*, *Betula pubescens* и *Salix phylicifolia*. Вместе с посадочным материалом были занесены кустарнички (*Empetrum hermaphroditum* Hagerup, *Vaccinium vitis-idaea* L., *V. myrtillus* L., *V. uliginosum* L., *Ledum palustre* L.) и некоторые травы (*Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv., *Lerchenfeldia flexuosa* (L.) Schur, *Calamagrostis neglecta* (Ehrh.) Gaerth., *C. lapponica* (Wahlenb.) Hartm., *Chamerion angustifolium* (L.) Holub), однако они имеют крайне угнетенный вид и очень низкое проективное покрытие (менее 0,1 %). Из мхов встречается один вид (*Pohlia nutans*)

с низким проективным покрытием (от 0,1 до 10 %), лишайники полностью отсутствуют. Надземная фитомасса напочвенного покрова практически не увеличивается по сравнению с пустошью, оставаясь близкой к нулю. Таким

образом, в условиях продолжающихся атмосферных выбросов и сильного загрязнения почв экономически выгодная хемофитостабилизация дает лишь кратковременный эффект, нуждающийся в постоянном поддержании.

Рис. 2. Среднее число видов растений на 100 м² на площадках мониторинга, заложенных на техногенных пустошах, участках хемофитостабилизации и ремедиации с нанесенным плодородным слоем

Fig. 2. The average number of plant species per 100 m² at the monitoring sites of technogenic barrens, chemophytostabilisation and remediation with organic matter-rich fertile cover materials applied

На участках ремедиации с нанесенным плодородным слоем видовая насыщенность варьирует от 7 до 17 видов на 100 м². Средние значения видовой насыщенности составляли от $7,8 \pm 0,5$ видов на 100 м² на пробной площади MRH2004 до $15,5 \pm 0,5$ видов на 100 м² на пробной площади MRH2008 (см. рис. 2). Увеличение видового разнообразия связано с посадкой лесных культур, в результате которой происходит занос тех же видов растений, что и на участках хемофитостабилизации, а также с посевом злаков из состава травосмесей (*Bromopsis inermis*, *Festuca rubra*, *F. pratensis*, *Dactylis glomerata*, *Elytrigia repens* и др.). Нередко происходит формирование травяного покрова с участием злаков (*Deschampsia caespitosa*, *Poa pratensis*, *Calamagrostis neglecta*) и/или *Equisetum pratense*. Наблюдается тенденция сокращения видового разнообразия с увеличением возраста посадок в связи с выпадением некоторых видов злаков (*Bromopsis inermis*, *Festuca rubra*, *F. pratensis*, *Dactylis glomerata*, *Phleum pratense*). Проективное покрытие травяного покрова достигает 25–55 %. Как и на участках хемофитостабилизации, из мхов встречается только один вид (*Pohlia nutans*) с очень низким проективным покрытием (менее 0,1 %), лишайники полностью отсутствуют. Надземная фитомасса

напочвенного покрова изменяется от 72 ± 42 до 189 ± 21 г·м⁻² с максимумом на участке ремедиации с мощным плодородным слоем (MRH2003).

Наблюдения показали, что существенным недостатком проводимых работ по ремедиации пустошей является низкое качество посадочного материала, изъятая из природы, а также использование газонных травосмесей с ограниченным видовым разнообразием растений. В условиях сильного загрязнения на участках ремедиации для формирования травяного покрова перспективны *Deschampsia caespitosa*, *Poa pratensis*, *Calamagrostis epigeios*, *C. phragmitoides*, *C. neglecta*, *Elytrigia repens*, *Agrostis gigantea*, *Chamaenerion angustifolium*. По-видимому, целесообразны посадка или посев азотфиксирующих растений (*Alnus incana*, *Trifolium pratense*, *T. repens*, *Lathyrus pratensis*), которые могут способствовать увеличению доступных для растений соединений азота. На бедных песчаных субстратах возможен посев или посадка пионерных кустарничков (*Empetrum hermaphroditum*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Arctous alpina*). Для биологической рекультивации необходимо использование качественного посадочного материала *Alnus incana*, *Betula pubescens*, *B. pendula*, *Populus tremula*, *Salix caprea*. Для этой це-

ли целесообразно создание специальных питомников для выращивания древесных растений с закрытой корневой системой. Важным условием успешной ремедиации является со-

здание благоприятных почвенных условий для высаживаемых видов растений (рН, доступность N, P, K и микроэлементов, стабилизация тяжелых металлов).

Рис. 3. Среднее проективное покрытие ярусов на площадках мониторинга, заложенных на техногенных пустошах, участках хемифитостабилизации и ремедиации с нанесенным плодородным слоем

Fig. 3. Average projective coverage of tiers at monitoring sites of technogenic barrens, chemophytostabilisation and remediation with organic matter-rich fertile cover materials applied

Ординация показателей состояния растительности. Ординация в сжатой графической форме представляет приближенные (методом ГК) значения нормированных анализируемых свойств (рис. 4, 5). Проанализированные показатели состояния растительности могут быть разбиты на две качественно разные группы: 1) проективное покрытие деревьев и кустарников в ярусах *B* и *C* (*U*), кустарничков (*Dsh*), трав (*Gr*), мхов (*M*) и надземная фитомасса напочвенного покрова (*Ph*); 2) численность здоровых (n_h), ослабленных (n_s), сильно ослабленных (n_{ss}), усыхающих (n_p), мертвых (n_d) и всех деревьев (n) на участках. Эти группы свойств растительности и были проанализированы методом ГК. Две первые ГК в первом случае описывают большую долю (68 %) общей изменчивости свойств, чем во втором (62 %), но, главное, свойства и особенно участки лучше структурируются и, соответственно, легче интерпретируются. Поэтому именно показатели проективного покрытия и были выбраны как основные свойства, а численность деревьев разного жизненного состояния рассматривалась как внешние. К внешним свойствам также были отнесены расстояние от комбината (*D*) и мощность верхнего, обогащенного органическим веществом, горизонта почв (*h*).

Первая ГК почти на 97 % определяется варьированием проективного покрытия трав

(36 %), надземной фитомассы напочвенного покрова (35 %) и проективного покрытия деревьев и кустарников в ярусах *B* и *C* (26 %). Это особенно четко видно на *диаграмме свойств* (см. рис. 4), где проекции этих свойств на плоскость двух первых ГК составляют малые углы с первой ГК (далее в этом разделе термин «свойство» будет для краткости также использоваться в значении «проекция свойства...»). Вторая ГК почти на 98 % определяется противофазным (разного знака) варьированием проективного покрытия мхов (56 %) и кустарничков (42 %). Это тоже четко проявляется на диаграмме свойств, где ПП мхов лежат в нижней полуплоскости и почти антипараллельны второй ГК, а ПП кустарничков – в верхней полуплоскости под острым углом ко второй ГК.

Представленные на этой же диаграмме внешние свойства тоже демонстрируют ряд особенностей. Расположенный в IV квадранте под небольшим углом к первой ГК вектор показателя мощности верхнего горизонта почв прямо связан с варьированием проективного покрытия трав, деревьев и кустарников и надземной фитомассы напочвенного покрова, что, по-видимому, может быть обусловлено положительным влиянием органического вещества верхнего горизонта почв на состояние растительности. Представленность кустарничков возрастает по мере удаления от комбината.

Численность здоровых и ослабленных деревьев, ожидаемо, связана прямо, а сильно ослабленных и усыхающих деревьев – обратно с ва-

рированием проективного покрытия деревьев и кустарников, трав и надземной фитомассы напочвенного покрова.

Рис. 4. Ординационная диаграмма показателей состояния растительности (проективное покрытие деревьев и кустарников в ярусах В и С (U), кустарничков (Dsh), трав (Gr), мхов (M) и надземная фитомасса живого напочвенного покрова (Ph); сплошные стрелки). Внешние по отношению к анализу ГК показатели (число здоровых (n_h), ослабленных (n_s), сильно ослабленных (n_{ss}), усыхающих (n_p), мертвых (n_d) и всех деревьев (n), а также расстояние от комбината (D) и мощность верхнего горизонта почв (h)) показаны пунктирными стрелками

Fig. 4. An ordination diagram of the vegetation properties (projective cover of trees and shrubs in tiers B and C (U), dwarf shrubs (Dsh), grasses (Gr), mosses (M), and aboveground phytomass of the ground layer (Ph); solid arrows). Variables external to the PC analysis (the number of healthy (n_h), impaired (n_s), severely impaired (n_{ss}), half-dead (n_p), dead (n_d) and all trees (n), as well as the distance from the industrial complex (D) and thickness of the upper soil horizon (h)) are shown by dotted arrows

Рис. 5. Ординационная диаграмма весов участков мониторинга по свойствам растительности: 1 – МП2003/6 и МП2004/5, 2 – МП2007/8 и МБ1, 3 – МР2004 и МР2007, 4 – МРН2007 и МРН2008, 5 – МРН2004 и МРН2005, 6 – МРН2006, 7 – МРН2003. Обозначение участков см. в табл. 1

Fig. 5. An ordination diagram of weights relative to the vegetation properties for the monitoring sites: 1 – МП2003/6 и МП2004/5, 2 – МП2007/8 и МБ1, 3 – МР2004 и МР2007, 4 – МРН2007 и МРН2008, 5 – МРН2004 и МРН2005, 6 – МРН2006, 7 – МРН2003. Designation of sample plots is presented in the Table 1

На ординационной диаграмме (см. рис. 5) участки мониторинга размещены вдоль первой ГК в соответствии с улучшением состояния растительности в направлении слева направо. Пунктирными линиями выделены кластеры участков. Четко выделяются две группы – участки с нанесенным плодородным слоем (два правых кластера, отмеченных серым точечным пунктиром) и почти все остальные участки (узкий, вытянутый вдоль второй ГК кластер слева). В этот узкий, почти вертикальный кластер входят техногенные пустоши и практически не отличающиеся от них по состоянию растительности участки хемофитостабилизации. Нанесение же обогащенного органическим веществом слоя, напротив, приводит к позитивным сдвигам. Крайний правый, самый старый участок ремедиации МРН2003, где сегодняшний успех становится очевидным, выделен специально (вопросы же о возможности его устойчивого долговременного саморазвития вблизи действующего производства, разумеется, остаются). Синим штриховым пунктиром выделен переход от техногенных пустошей к растительности наименее успешных участков с нанесенным органоминеральным слоем. Это сохранившееся на переходе к пустоши техногенное березовое редколесье. В пространстве двух первых ГК этот переход выглядит как узкая область, вытянутая вдоль первой ГК; левой стороной она соприкасается с областью техногенных пустошей, а правой неглубоко проникает в область участков с нанесенным органоминеральным слоем. Окружающие область сохранившегося березового редколесья малоуспешные участки ремедиации вытянуты вдоль второй ГК; в этом смысле они схожи с участками хемофитостабилизации, окружающими техногенные пустоши и также вытянутыми вдоль второй ГК.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что естественное восстановление техногенных пустошей в условиях сохраняющегося сильного загрязнения окружающей среды невозможно. Существенным препятствием для восстановления растительности на техногенных территориях наряду с сильной трансформацией экотопов в результате техногенного загрязнения и пожаров является отсутствие источников семян как пионерных, так и позднесукцессионных видов растений в связи с огромными площадями нарушенных

земель и ограниченными возможностями расселения этих видов.

Эффективность ремедиации техногенных территорий в условиях сокращения атмосферных промышленных выбросов в значительной степени зависит от состояния почв и применяемой технологии. Экологически благоприятная и экономически выгодная хемофитостабилизация без подготовки почвы в настоящее время не приводит к восстановлению пустошей. Высаженные деревья и кустарники имеют сильно угнетенный вид, а живой напочвенный покров не восстанавливается. Эти участки слабо отличаются от техногенных пустошей в связи с неблагоприятными эдафическими условиями (сильная кислотность, бедность доступных элементов минерального питания растений, высокое содержание доступных соединений основных загрязняющих металлов – Ni и Cu).

Анализ состояния растительности показал, что более перспективным способом быстрого восстановления пустошей является ремедиация путем нанесения на поверхность загрязненных почв сконструированного плодородного слоя в сочетании с посадкой лиственных деревьев и посевом многолетних трав. На участках ремедиации с нанесенным плодородным слоем отмечено формирование разреженных лиственных молодняков с преобладанием ивы козьей и березы пушистой, а также происходит восстановление травяного покрова с участием злаков и/или хвоща лугового. Деревья на участках ремедиации имеют более высокий уровень жизнеспособности, чем на пустошах и участках хемофитостабилизации. Однако применение этого метода ограничено высокой стоимостью работ и оставлением новых «промышленных следов» при использовании и транспортировке природных материалов.

Результаты анализа главных компонент выявляют четкое разделение участков мониторинга по состоянию растительности на две основные группы в зависимости от применяемой технологии. Первую группу образуют участки с нанесенным плодородным слоем, среди которых выделяется в отдельный кластер наиболее успешный участок самой ранней ремедиации 2003 г. В другую группу входят почти все остальные участки – техногенные пустоши и почти не отличающиеся от них участки хемофитостабилизации. Таким образом, объективное структурирование данных подтверждает, что примененная технология хемофитостабилизации малоэффективна на сильнозагрязненных участках техногенных пустошей.

Библиографический список

1. Panagos, P. Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network / P. Panagos, M. Van Liedekerke, Y. Yigini, L. Montanarella // *J Environ Public Health*. – 2013. – 11 p. Article ID 158764.
2. Kozlov, M. V. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy / M. V. Kozlov, E. L. Zvereva // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* – 2007. – Vol. 6. – P. 231–259.
3. Воробейчик, Е. Л. Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: методология исследований, экспериментальные схемы, распространенные ошибки / Е. Л. Воробейчик, М. В. Козлов // *Экология*. – 2012. – № 2. – С. 83–91.
4. Kuhlberg, M. Protection to the Sulphur-Smoke Tort-feasors : The Tragedy of Pollution in Sudbury, Ontario, the World's Nickel Capital, 1884–1927 / M. Kuhlberg, S. Miller // *The Canadian Historical Review*. – 2018. – Vol. 99, № 2. – P. 225–257.
5. Pulford, I. D. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review / I. D. Pulford, C. Watson // *Environment International*. – 2003. – Vol. 29. – P. 529–540.
6. Восстановление территорий, нарушенных воздушным загрязнением медно-никелевого производства на Кольском полуострове / В. В. Никонов, Н. В. Лукина, Л. Г. Исаева, Т. Т. Горбачева, Е. А. Белова // *Инновационный потенциал Кольской науки : сб. науч. тр. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2005. – Т. 2. – С. 284–288.*
7. The use of indigenous plant species and calcium phosphate for the stabilization of highly metal-polluted sites in southern Poland / R. Kucharski, A. Sas-Nowosielska, E. Małkowski, J. Japenga, J. M. Kuperberg, M. Pogrzeba, J. Krzyżak // *Plant and Soil*. – 2005. – Vol. 273. – P. 291–305.
8. Капелькина, Л. П. О естественном зарастании и рекультивации нарушенных земель Севера / Л. П. Капелькина // *Успехи современного естествознания*. – 2012. – № 11. – С. 98–102.
9. Копчик, Г. Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) / Г. Н. Копчик // *Почвоведение*. – 2014. – № 9. – С. 1113–1130.
10. Watkinson, A. D. Developing manufactured soils from industrial by-products for use as growth substrates in mine reclamation / A. D. Watkinson, A. S. Lock, P. J. Beckett, G. Spiers // *Restoration Ecology*. – 2017. – DOI 10.1111/rec.12464.
11. Лукина, Н. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты / Н. В. Лукина, В. В. Никонов. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1998. – 316 с.
12. Лукина, Н. В. Техногенные сукцессии в лесах Кольского полуострова / Н. В. Лукина, Т. В. Черненкова // *Экология*. – 2008. – № 4. – С. 1–9.
13. Копчик, Г. Н. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике / Г. Н. Копчик, С. В. Копчик, И. Е. Смирнова // *Почвоведение*. – 2016. – № 11. – С. 1375–1391.
14. The ecological state of the ecosystems in the border areas between Norway and Russia / D. Aamlid, N. Vassilieva, P. Aarrestad, M. Gytarsky, S. Lindmo, R. Karaban, V. Korotkov, T. Rindal, V. Kuzmicheva, K. Venn // *Boreal Environment Research*. – 2000. – Vol. 5, № 3. – P. 257–278.
15. Черненкова, Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение / Т. В. Черненкова. – М. : Наука, 2002. – 191 с.
16. Копчик, С. В. Ординация растительных сообществ лесных биогеоценозов Кольского Севера в условиях атмосферного загрязнения / С. В. Копчик, Г. Н. Копчик, Л. В. Меряшкина // *Экология*. – 2004. – № 3. – С. 190–199.
17. Кашулина, Г. М. Трансформация органического вещества почв в условиях экстремального загрязнения выбросами комбината «Североникель» / Г. М. Кашулина, В. Н. Переверзев, Т. И. Литвинова // *Почвоведение*. – 2010. – № 10. – С. 1265–1275.
18. Методические подходы к экологической оценке лесного покрова в бассейне малой реки / А. А. Алейников, О. Н. Бахмет, М. В. Бобровский и др. ; под ред. Л. Б. Заугольной, Т. Ю. Браславской. – М. : Товарищество научных изданий КМК, 2010. – 383 с.
19. Андерсон, Т. Введение в многомерный статистический анализ / Т. Андерсон. – М. : Физматгиз, 1963. – 500 с.
20. Jongman, H. J. Ordination / H. J. Jongman ; ed. by C. J. F. ter Braak, O. F. R. van Tongeren // *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. – 1987. – P. 91–173.
21. Кадулин, М. С. Эмиссия CO₂ почвами в зоне влияния ГМК «Североникель» в Кольской Субарктике / М. С. Кадулин, Г. Н. Копчик // *Почвоведение*. – 2013. – № 11. – С. 1387–1396.
22. Successes in application of biotechnologies to land remediation on mine land in the Russian sub-arctic / S. Koptsik, G. Koptsik, V. Korotkov, G. Spiers, P. Beckett // *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* / ed. by M. N. V. Prasad, P. J. de Campos Favas, S. K. Maiti. – 2018. – P. 547–570.

References

1. Panagos P., Van Liedekerke M., Yigini Y., Montanarella L. *J Environ Public Health*. 2013, 11 p. Article ID 158764.
2. Kozlov M. V., Zvereva E. L. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2007, vol. 6, pp. 231–259.
3. Vorobejchik E. L., Kozlov M. V. *Ekologiya* [Ecology]. 2012, no. 2, pp. 83–91.

4. Kuhlberg M., Miller S. *The Canadian Historical Review*. 2018, vol. 99, no. 2, pp. 225–257.
5. Pulford I. D., Watson C. *Environment International*. 2003, vol. 29, pp. 529–540.
6. Nikonov V. V., Lukina N. V., Isaeva L. G., Gorbacheva T. T., Belova E. A. *Innovacionnyj potencial Kol'skoj nauki: sb. nauch. tr.* [Innovative potential of the Kola science: collection of articles]. Apatity: Izd-vo KNC RAN, 2005, vol. 2, pp. 284–288.
7. Kucharski R., Sas-Nowosielska A., Małkowski E., Japenga J., Kuperberg J. M., Pogrzeba M., Krzyżak J. *Plant and Soil*. 2005, vol. 273, pp. 291–305.
8. Kapel'kina L. P. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Achievements of modern natural sciences]. 2012, no. 11, pp. 98–102.
9. Kopcik G. N. *Pochvovedenie* [Soil studies]. 2014, no. 9, pp. 1113–1130.
10. Watkinson A. D., Lock A. S., Beckett P. J., Spiers G. *Restoration Ecology*. 2017. DOI 10.1111/rec.12464.
11. Lukina N. V., Nikonov V. V. *Pitatel'nyj rezhim lesov severnoj tajgi: prirodnye i tekhnogennye aspekty* [North taiga forests' nutritive regime: natural and anthropogenic aspects]. Apatity: Izd-vo KNC RAN, 1998, 316 p.
12. Lukina N. V., Chernen'kova T. V. *Ekologiya* [Ecology]. 2008, no. 4, pp. 1–9.
13. Kopcik G. N., Kopcik S. V., Smirnova I. E. *Pochvovedenie* [Soil studies]. 2016, no. 11, pp. 1375–1391.
14. Aamlid D., Vassilieva N., Aarrestad P., Gytarsky M., Lindmo S., Karaban R., Korotkov V., Rindal T., Kuzmicheva V., Venn K. *Boreal Environment Research*. 2000, vol. 5, no. 3, pp. 257–278.
15. Chernen'kova T. V. *Reakciya lesnoj rastitel'nosti na promyshlennoe zagryaznenie* [Forest vegetation reaction to industrial pollution]. Moscow: Nauka, 2002, 191 p.
16. Kopcik S. V., Kopcik G. N., Meryashkina L. V. *Ekologiya* [Ecology]. 2004, no. 3, pp. 190–199.
17. Kashulina G. M., Pereverzev V. N., Litvinova T. I. *Pochvovedenie* [Soil studies]. 2010, no. 10, pp. 1265–1275.
18. Alejnikov A. A., Bahmet O. N., Bobrovskij M. V. *Metodicheskie podhody k ekologicheskoj ocenke lesnogo pokrova v bassejne maloj reki* [Methodological approaches to ecological evaluation of forest cover in headwater basin]. Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2010, 383 p.
19. Anderson T. *Vvedenie v mnogomernyj statisticheskij analiz* [Introduction to multidimensional statistical analysis]. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 500 p.
20. Jongman H. J. *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. 1987, pp. 91–173.
21. Kadulin M. S., Kopcik G. N. *Pochvovedenie* [Soil studies]. 2013, no. 11, pp. 1387–1396.
22. Koptsik S., Koptsik G., Korotkov V., Spiers G., Beckett P. *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*. 2018, pp. 547–570.