

БИОИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.Г. Опекунова¹, А.Р. Никулина², И.С. Гайдыш³, И.В. Кушнир⁴, В. Прохорова⁵

^{1, 2, 4, 5} Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра геоэкологии

³ Объединенная дирекция государственного заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский»

¹ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: m.opkunova@mail.ru

² Студентка магистратуры; e-mail: anna.2001-nik@mail.ru

³ Зам. директора по научно-исследовательской, эколого-просветительской деятельности и экологическому мониторингу, канд. биол. наук; e-mail: isgaydysh@gmail.com

⁴ Студентка магистратуры; e-mail: sakhalin.ira.sakh@gmail.com

⁵ Студентка бакалавриата; e-mail: LeraLaneige03@mail.ru

Дана оценка состояния компонентов окружающей среды в регионе воздействия АО «Карельский окатыш», Республика Карелия. Установлено содержание металлов (Mn, K, Sc, V, Sr, Fe, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Cd, Ba, Pb, Ti) в почвах, коре сосны *Pinus sylvestris* и листьях березы *Betula pubescens*, изучены изменения анатомо-морфологических характеристик растений. За фон приняты природно-территориальные комплексы в Костомукшском заповеднике. Показано, что химический состав почв и растений определяется химизмом подстилающих горных пород, особенностями рудопроявления и интенсивностью торфонакопления. Загрязнение окружающей среды в районе комбината имеет локальный слабо-выраженный характер. При пылении от карьеров в почвы и растения поступают K, Sr, Ba, Fe, Mn, Ti. Загрязнение от автотранспорта связано с увеличением концентраций Pb, Zn, Cu, Cd. Биотестирование на *Daphnia magna* и *Chlorella vulgaris* отразило низкий уровень токсичности почв. Наиболее показательным является применение комплекса биоиндикационных признаков, чувствительных к малозаметным изменениям состояния окружающей среды. Морфологические отклонения растений под влиянием загрязнения усиливаются в 1,5–4 раза, проективное покрытие эпифитных лишайников снижается до 0% по сравнению с фоном. На территории комбината климатический сигнал радиального прироста *P. sylvestris* подавляется антропогенным воздействием, минимальные и максимальные индексы прироста уменьшаются в 1,5–3 раза относительно фона. Интегральный биоиндикационный показатель *BIP* (*Bioindication integral parameter*) на основе функции желательности Харрингтона указывает на отсутствие антропогенного воздействия в заповеднике (*BIP* = 0,77–0,84), «средний» (*BIP* = 0,37–0,63) и «высокий» (*BIP* = 0,28–0,37) уровни трансформации природной среды вблизи производственных объектов на территории комбината. Обочины дорог, производственные площадки, вырубки зарастают апохорными и рудеральными видами *Urtica dioica*, *Calamagrostis arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Tussilago farfara*, *Picris hieracioides* и др. На рекультивированных участках старых отвалов вскрышных пород массовое развитие получают инвазивные *Ribes nigrum*, *Frangula alnus*, *Melandrium dubium* и др. Отмечена необходимость регулярных мониторинговых исследований, контроля содержания Fe, Ni, V, Pb, Cu и Zn в компонентах окружающей среды в зоне воздействия железорудных предприятий.

Ключевые слова: химический состав почв и растений, биоиндикаторы, анатомо-морфологические показатели трансформации, *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens*, биотестирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.2

ВВЕДЕНИЕ

Горнорудное производство характеризуется широким спектром преобразований окружающей среды, включающих ландшафтно-деструктивные, параметрические и эмиссионные воздействия. Максимальный негативный эффект оказывают ландшафтно-деструктивные нарушения при строительстве карьеров, образовании отвалов вскрышных пород. Эмиссионные воздействия включают поступление загрязняющих веществ при карьерных, земляных и сварочных работах, пылении хвостов,

работе автотранспорта и др. Природно-территориальные комплексы претерпевают комплексную трансформацию, проявляющуюся во всех компонентах среды [Zamotaev et al., 2017; Agboola et al., 2020; Li et al., 2021]. Диагностика техногенных трансформаций и разработка мер по минимизации негативного воздействия составляют важную практическую задачу.

Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ныне АО «Карельский окатыш») функционирует с 1982 г., разрабатывает крупнейшее на

северо-западе России месторождение железистых кварцитов и ежегодно производит 20% всех российских железорудных окатышей. В составе комбината эксплуатируются три карьера, отвалы, дробильный цех, горно-обогатительная фабрика, хвостохранилище, система водоотводных каналов, железнодорожная станция и др. На протяжении всего технологического цикла в воздух выбрасываются пыль неорганическая, сажа, HF, пары керосина, эмульсол, бенз(а)пирен, различные соединения S, N, C, Fe, Al, Mn, Cr, Si и др. В 10 км к юго-западу от комбината расположен г. Костомукша с численностью населения 26 тыс. чел. Основным источником загрязнения в городе является автомобильный транспорт. В городе нет поста постоянных наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха, поэтому особенно возрастает роль исследований на основе биоиндикации, которые активно применяются для оценки состояния окружающей среды и обнаружения малозаметных изменений [Биоиндикация..., 1988; Опекунова, 2013; Rybicki et al., 2019; Bayouli et al., 2021; Thakur et al., 2024]. В настоящее время при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды широко используется комплекс биоиндикационных признаков, включающий анализ различных параметров биоты на всех уровнях организации живого вещества. Используются биохимические, физиологические, анатомо-морфологические изменения растений [Минкина и др., 2015; Лянгузова, 2016; Markert, 1993; Fares, 2014; Urosevic et al., 2023], популяционные и видовые особенности [Katjutin et al., 2020; Stavrova, 2020], флористический состав и структура сообществ [Ярмишко и др., 2011; Тишков и др., 2021], границы и пространственное распределение фитоценозов [Регионы..., 2014; Карташев, 2021; Giljum et al., 2022].

Наиболее показательно изменение химического состава растений, являющихся одними из первых звеньев биогенной миграции и во многом определяющих интенсивность биогеохимического круговорота [Markert, 1993; Capozzi et al., 2016; Thakur et al., 2024]. Химический состав биоты отражает состояние всех абиотических компонентов ландшафта: подстилающих горных пород, почв, грунтовых и поверхностных вод, атмосферного воздуха, а также климатические особенности территории [Баргальи, 2005; Кошелева и др., 2013; Опекунова, 2013]. Широко используемые для оценки трансформации природной среды морфологические признаки растений характеризуют действие комплекса природных и антропогенных факторов, поэтому для грамотной идентификации воздействующих агентов необходима репрезентативная информация о химическом составе почв и растений [Здоровье среды..., 2000; Опекунова и др., 2023]. Особый интерес представ-

ляет применение методов биотестирования, которые позволяют оценить биологические эффекты при загрязнении, появлении токсичных доз химических элементов и их соединений в компонентах окружающей среды [Korobova, 2020; Terekhova, 2022].

Научные исследования отдельных компонентов ландшафта на данной территории проводятся различными коллективами практически с начала активной деятельности комбината [Пантелеева, 2009; Федорец, Солодовников, 2013; Галахина, 2016]. Более 25 лет длится сотрудничество кафедры геоэкологии Санкт-Петербургской государственного университета (СПбГУ) и Костомукшского заповедника. Однако исследования, включающие изучение комплекса биоиндикационных признаков для оценки состояния окружающей среды, ранее не проводились. В 2021–2023 гг. АО «Карельский окатыш», Костомукшским заповедником и кафедрой геоэкологии СПбГУ реализована совместная Программа по мониторингу и сохранению биоразнообразия в регионе воздействия комбината.

Цель работы – оценка эффективности использования комплекса биоиндикационных признаков для диагностики слабовыраженных изменений трансформации окружающей среды под воздействием железорудного производства в регионе воздействия АО «Карельский окатыш».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геоэкологические исследования проведены в 2021–2023 гг. на 63 станциях мониторинга (СМ) (рис. 1): фоновых в Костомукшском заповеднике (10 СМ) и контрольных в г. Костомукша и на разном удалении от комбината (53 СМ). Изучены типичные и широко распространенные в регионе фитоценозы, представленные еловыми и сосновыми северо-таежными сообществами (*Piceetum myrtilloso-hylocomiosum*, *Pineto-Piceetum fruticulosum-empetroso-hylocomiosum*, *Pinetum empetroso-vaccinosum-cladinoso-hylocomiosum* и др.), верховыми кустарничково-сфагновыми (*Pinus sylvestris* – *Ledum palustre* + *Chamaedaphne calyculata* + *Eriophorum vaginatum* – *Sphagnum angustifolium* + *S. magellanicum* и др.) и мезотрофными болотами (*Eriophorum angustifolium* + *Carex rostrata* – *Sphagnum fallax* + *S. angustifolium* и др.), а также щучковыми лугами (*Deschampsia cespitosa* + *Herbae prata*). Для оценки потока химических веществ и изменения биоиндикационных параметров в структуре ландшафтно-геохимических сопряжений изучены ландшафтно-геохимические катены на моренных (СМ 1–3) и флювиогляциальных (СМ 26–28) отложениях; профили охватывают подножия, склоны и вершины моренного холма и оза соответственно.

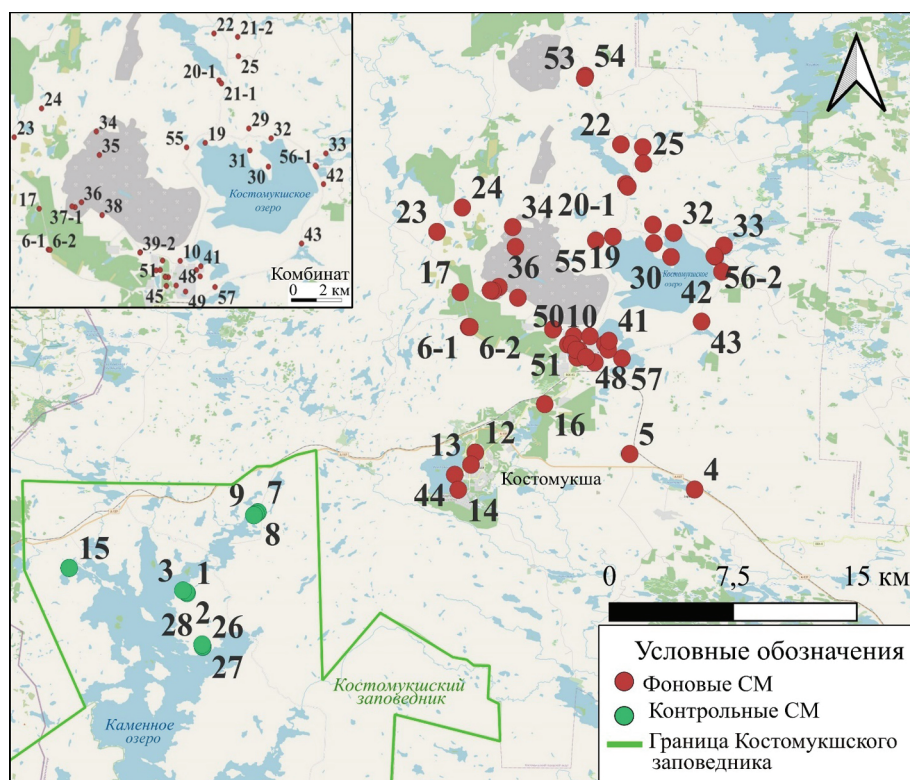


Рис. 1. Карта-схема расположения станций мониторинга

Fig. 1. Map of the location of monitoring stations

На каждой СМ проведено комплексное геоэкологическое описание, отобраны пробы почв из органического и иллювиального горизонтов в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017, индикаторных видов растений, отвечающих требованиям биоиндикации, – *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar et Vězda и *C. rangiferina* (L.) F.H. Wigg., корки и пыльцы сосны *Pinus sylvestris* L., листьев березы *Betula pubescens* Ehrh. Кустистые лишайники представляют особый интерес, поскольку составляют кормовую базу краснокнижного лесного северного оленя *Rangifer tarandus* L.

В почвах естественной влажности в полевых условиях определялась величина pH с помощью pH-метра Horiba LAQUAtwin B-712. Проведены дендрохронологические исследования кернов *P. sylvestris* на приборе LINTAB-6, в программах TSAPWin Professional, Cofecha, ARSTAN, данные представлены в индексах, полученных при делении толщины годовичного кольца на среднюю толщину для данного биологического возраста [Ваганов и др., 2008; Speer, 2010].

Проведен цитологический анализ пыльцы сосны на микроспорофиллах из средней части микростробила, в каждой пробе не менее 500 пыльцевых зерен, увеличение 10×40 [Дзюба, 2006]. Рассчитан интегральный показатель флуктуирующей асимметрии (ИПФА) листьев березы [Здоровье среды..., 2000], подсчитано среднее число устьиц на листьях в не-

скольких полях зрения на разных препаратах (около центральной части жилки, в основании листа, на краю листовой пластины), увеличение 10×40.

Валовое содержание металлов (Me: Mn, K, Sc, V, Sr, Fe, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Cd, Ba, Pb, Ti) в почвах и растениях определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ISP-MS) на приборе ELAN-6100 DRC с полным кислотным разложением проб по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 в аккредитованной лаборатории института имени А.П. Карпинского. Концентрация подвижных форм (ПФ) Me в почвах (вытяжка ацетатно-аммонийным буфером, pH = 4,8) и их содержание в растениях установлены в Ресурсном центре «Методы анализа состава вещества» СПбГУ методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 Shimadzu, аналитик В.Н. Григорьян. Предварительно пробы растений озолялись в муфельной печи при температуре 450°. Зольность рассчитывалась по формуле: $A = (m_2 - m_1) / C \cdot 100$ (%), где m_1 – вес тигля, г; m_2 – вес тигля с золой, г; C – навеска абсолютно сухого растительного материала, г. Концентрация сульфатов в корке сосны определена турбидиметрическим методом [Методы..., 2015]; биотестирование почв на тест-объектах *Daphnia magna* Straus. и *Chlorella vulgaris* Beijer проведено согласно ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.12-06, 16.1:2.3:4.10-04 в учебной лаборатории СПбГУ.

Корреляционный и факторный анализы (ФА) методами главных компонент и максимального правдоподобия выполнены в программном пакете STATISTICA 26.0 (StatSoft). Интерпретация результатов факторного анализа проведена на основе химического состава парагенетических ассоциаций, нагрузок факторов и их пространственного распределения, а также уровня содержания Ме в компонентах окружающей среды. Коэффициент биологического поглощения A_x определен как отношение концентраций Ме в растениях к валовому содержанию в почве; коэффициент биогеохимической подвижности B_x – как отношение концентрации Ме в растениях к содержанию ПФ Ме в почве [Регионы..., 2014]. Рассчитан интегральный биоиндикационный показатель BIP (*Bioindication integral parameter*) с использованием функции желательности Харрингтона [Опекунов, Опекунова, 2014; Опекунова и др., 2023], учитывающий варьирование изученных биоиндикационных параметров и содержание Ме в почвах и растениях. Весовые коэффициенты приняты равными 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав почв. В условиях гумидного климата, промывного режима увлажнения и подкисления смоляными кислотами в составе хвойного опада для почв заповедника характерно широкое варьирование pH от 3,85 до 6,76. В органогенном горизонте реакция среды кислая и слабокислая, при продвижении вниз по профилю pH возрастает. На территории комбината pH увеличивается до 4,20–7,40, с глубиной в иллювиальном горизонте pH снижается, поскольку в органогенный горизонт при дроблении вмещающих пород с пылью попадают подщелачивающие соединения Ca и K.

В почвах заповедника концентрации Zn, Ba, Sr, Mn, Cu, Co, Fe, Sc, Ni, V, Cr, Pb ниже кларков [Требования..., 2005] в 2,4–14 раз в органогенных горизонтах и в 1,7–7 раз – в иллювиальных. Концентрации Cd в органогенном горизонте превышают кларк в 2 раза, что связано с закреплением Cd органическим веществом при хелатообразовании [Hou et al., 2019]. В г. Костомукша в 1,6–3 раза относительно фона возрастают содержания V, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb в органогенных горизонтах и в 1,8–2 раза концентрации Cr, Fe, Pb – в иллювиальных (табл. 1). В импактной зоне в органогенных горизонтах отмечены превышения валовых содержаний Cr, Mn, Ni, Cu в 1,5–5 раз и Fe в 2,5–14 раз. В иллювиальных горизонтах различия выражены в меньшей степени, фон этих Ме превышен в 1,5–2 раза.

По особенностям миграции и аккумуляции в почвах выделены три группы Ме. В иллювиальных горизонтах концентрируются K, Sc, V, Cr, Co, Sr, Ba (различия с органогенным горизонтом – в 2–4 раза), в органогенных – Mn, Cu, Pb, Zn, Cd (1,4–3). Распределение по почвенному профилю Fe и Ni равномерно. ФА указывает на преобладание породного фактора в формировании химического состава почв: до 33,0% дисперсии в органогенном горизонте ($Sc_{99}Ba_{80}Pb_{69}Cr_{65}Cu_{56}Co_{56}V_{55}Cd_{54}Ni_{33}Zn_{26}^1$) и до 54,4% в иллювиальном ($Mn_{100}Co_{100}Ni_{98}Fe_{91}Cd_{55}Zn_{51}Ba_{22}V_{21}$).

В органогенных горизонтах вторым ведущим фактором (20,1%) служит антропогенное загрязнение: $\frac{Fe_{54}V_{50}Cr_{60}Ni_{48}}{Pb_{57}Cd_{13}Ba_{42}Zn_{16}}$, в числителе – рудные элементы, в знаменателе – металлы, образующие хелатные комплексы в составе полуразложившегося органического вещества. С пылью вблизи карьеров и цехов дробления осаждаются Ме, представленные ассоциацией $Mn_{86}Zn_{85}Co_{78}Cd_{63}Cu_{55}Ni_{48}Ba_{46}Fe_{41}Pb_{35}V_{34}Cr_{22}$ (30,6%). Пыль грунтовых дорог представлена парагенезисом $Sr_{97}Ba_{89}Mn_{57}$ (22,2% факторных нагрузок), что согласуется с литературными данными [Федорец, Солодовников, 2013].

В иллювиальном горизонте второй фактор ($\frac{Sc_{88}Cr_{62}V_{80}Ba_{54}}{Cu_{60}Cd_{40}Pb_{25}Zn_{25}}$, 26,2%) указывает на основные носители Ме в альфегумусовых почвах: накопление Sc, Cr, V, Ba в составе минеральных компонентов и Cu, Cd, Pb, Zn – в органоминеральных комплексах. Третий фактор в срединном горизонте ($\frac{Pb_{40}Cr_{60}V_{34}Cu_{41}Zn_{11}}{Ba_{60}}$, 11,0%) связан с комплексным воздействием при добыче, транспортировке и обогащении руды.

Большинство изученных Ме в органогенных горизонтах почв фоновых СМ характеризуются низкой подвижностью: V – 0,85% ПФ от валового содержания; Cr, Fe, Pb – 1,4–6,3%. Более подвижны Ni, Ba, Cd (9,8–12,4%), максимальное содержание ПФ в кислых и слабокислых почвах характерно для Zn (30%); Mn (33%), Cu (56%). В иллювиальных горизонтах с ростом pH и уменьшением содержания органического вещества подвижность Ме снижается: Fe (до 0,41%); Ni, Ba, Cr, Mn (до 1,1–4,2%), Zn (15,6%), Cu (39%). В почвах центральной части г. Костомукша концентрации Cu, Zn и Pb превышают ПДК до 2,5 раза вблизи перекрестков и крупных автостоянок, что указывает на преимущественное загрязнение от автотранспорта. На территории комбината отмечается увеличение в органогенных горизонтах почв Cd, Fe, Mn, Cr, Ni и V с превышением фона в 2–6 раз; в иллювиальных горизонтах Cd, V, Fe, Cr, Ni – в 2–10 раз. В почвах СМ на комбинате наибольшая подвиж-

¹ Цифрами обозначены значения нагрузок фактора на Ме, умноженные на 100.

² В числителе указаны Ме с положительными, в знаменателе – с отрицательными нагрузками на парагенезис.

ность характерна для Cd, Cu, Zn (до 25–29% от валового содержания) и Mn (58%). Индикатором техногенеза является увеличение подвижности Cd, Fe, Mn, Cr, V в 2–6 раз в органогенных горизонтах и в 2–15 раз – в иллювиальных горизонтах почв импактной зоны по сравнению с фоном.

Таблица 1

Химический состав почв

Горизонт	Металл	Костомукшский заповедник (n = 10)			г. Костомукша (n = 4)			АО «Карельский окатыш» (n = 36)			Кларк почв [Требования..., 2005]
		среднее	min	max	среднее	min	max	среднее	min	max	
Органогенный	V	<u>6,6</u> 0,06	<u>1,3</u> 0,03	<u>10,1</u> 0,15	<u>20,0</u> 0,19	<u>7,9</u> 0,06	<u>25</u> 0,39	<u>28</u> 0,37	<u>16,0</u> <0,02	<u>57</u> 1,9	<u>90</u> –
	Cr	<u>10,3</u> 0,14	<u>1,0</u> <0,02	<u>32</u> 0,53	<u>11,7</u> 0,43	<u>6,1</u> <0,02	<u>19,0</u> 1,1	<u>25</u> 0,52	<u>11</u> <0,02	<u>41</u> 2,1	<u>70</u> –
	Mn	<u>250</u> 82	<u>50</u> 7,5	<u>450</u> 232	<u>300</u> 35	<u>50</u> 2,6	<u>950</u> 84	<u>450</u> 249	<u>50</u> 9,2	<u>1250</u> 4210	<u>1000</u> –
	Fe	<u>5500</u> 130	<u>1600</u> 3,7	<u>13300</u> 1117	<u>13500</u> 88	<u>4600</u> 7,3	<u>19100</u> 184	<u>41200</u> 460	<u>10300</u> 13,4	<u>119700</u> 3355	<u>40000</u> –
	Co	<u>1,7</u> <0,02	<u>1,4</u> <0,02	<u>2,2</u> <0,02	<u>2,1</u> <0,02	<u>1,5</u> <0,02	<u>2,6</u> <0,02	<u>3,4</u> <0,02	<u>1,3</u> <0,02	<u>8,4</u> <0,02	<u>8,0</u> –
	Ni	<u>6,1</u> 0,59	<u>2,1</u> 0,18	<u>11,9</u> 3,6	<u>13,1</u> 0,41	<u>8,4</u> 0,28	<u>16,2</u> 0,68	<u>26</u> 2,8	<u>12,4</u> 0,30	<u>86</u> 43	<u>50</u> –
	Cu	<u>7,2</u> 4,0	<u>0,50</u> <0,02	<u>13,3</u> 11,3	<u>15,9</u> 1,4	<u>13,3</u> <0,02	<u>17,7</u> 4,6	<u>22</u> 1,2	<u>7,2</u> <0,02	<u>104</u> 6,6	<u>30</u> –
	Zn	<u>37</u> 11,2	<u>4,5</u> 2,1	<u>61</u> 27	<u>61</u> 13,5	<u>17,9</u> 6,5	<u>121</u> 31	<u>53</u> 12,7	<u>31</u> 1,2	<u>105</u> 42	<u>90</u> –
	Sr	<u>64</u> –	<u>36</u> –	<u>79</u> –	<u>57</u> –	<u>44</u> –	<u>79</u> –	<u>74</u> –	<u>33</u> –	<u>116</u> –	<u>250</u> –
	Cd	<u>0,73</u> 0,09	<u>0,40</u> <0,02	<u>1,3</u> 0,21	<u>0,55</u> 0,04	<u>0,16</u> <0,02	<u>1,3</u> 0,13	<u>0,55</u> 0,20	<u>0,10</u> <0,02	<u>1,4</u> 2,2	<u>0,35</u> –
	Ba	<u>163</u> 16,4	<u>11,0</u> 2,7	<u>412</u> 37	<u>141</u> 25	<u>117</u> 12	<u>173</u> 33	<u>185</u> 23	<u>96</u> 6,6	<u>303</u> 58	<u>500</u> –
	Pb	<u>15,8</u> 1,0	<u>5,4</u> <0,02	<u>31</u> 2,1	<u>26</u> 2,1	<u>10,4</u> 1,5	<u>37</u> 2,4	<u>16,1</u> 1,17	<u>4,2</u> <0,02	<u>25</u> 3,5	<u>12</u> –
Иллювиальный	V	<u>–</u> 0,11	<u>–</u> 0,03	<u>–</u> 0,32	<u>88</u> 0,24	<u>73</u> 0,08	<u>102</u> 0,52	<u>72</u> 0,36	<u>49</u> 0,03	<u>113</u> 3,2	<u>90</u> –
	Cr	<u>40</u> 0,44	<u>31</u> <0,02	<u>55</u> 1,5	<u>74</u> 2,0	<u>65</u> <0,02	<u>83</u> 5,0	<u>65</u> 3,3	<u>43</u> 0,12	<u>104</u> 26	<u>70</u> –
	Mn	<u>300</u> 11,9	<u>250</u> 0,94	<u>300</u> 45	<u>400</u> 1,2	<u>300</u> 0,61	<u>500</u> 1,6	<u>300</u> 14,8	<u>200</u> 0,53	<u>450</u> 71	<u>1000</u> –
	Fe	<u>15700</u> 65	<u>12400</u> 6,2	<u>19500</u> 211	<u>32700</u> 224	<u>27800</u> 5,3	<u>37500</u> 554	<u>33900</u> 366	<u>20800</u> 23	<u>52300</u> 1935	<u>40000</u> –
	Co	–	–	–	<u>8,9</u> <0,02	<u>6,6</u> <0,02	<u>11,2</u> <0,02	<u>6,9</u> <0,02	<u>4,6</u> <0,02	<u>10,0</u> <0,02	<u>8,0</u> –
	Ni	<u>14,9</u> 0,22	<u>12,7</u> 0,10	<u>19,3</u> 0,40	<u>21</u> 0,26	<u>20</u> 0,17	<u>22</u> 0,35	<u>21</u> 2,2	<u>13,3</u> 0,12	<u>31</u> 47	<u>50</u> –
	Cu	<u>4,9</u> 1,9	<u>4,0</u> <0,02	<u>5,5</u> 10,1	<u>6,4</u> 1,5	<u>6,1</u> 0,40	<u>6,7</u> 3,6	<u>7,8</u> 1,7	<u>3,4</u> <0,02	<u>17,2</u> 14,7	<u>30</u> –
	Zn	<u>29</u> 4,5	<u>22</u> 0,94	<u>40</u> 20	<u>29</u> 1,4	<u>20</u> 1,0	<u>38</u> 1,9	<u>29</u> 4,5	<u>19,0</u> 0,73	<u>46</u> 49	<u>90</u> –
	Cd	<u>–</u> 0,01	<u>–</u> <0,02	<u>–</u> 0,03	<u>0,09</u> 0,01	<u>0,04</u> <0,02	<u>0,14</u> <0,02	<u>0,14</u> 0,02	<u>0,07</u> <0,01	<u>0,19</u> 0,30	<u>0,35</u> –
	Ba	<u>377</u> 8,5	<u>328</u> 2,9	<u>403</u> 14,3	<u>426</u> 12,3	<u>407</u> 3,8	<u>445</u> 26	<u>457</u> 7,0	<u>370</u> 2,9	<u>451</u> 25	<u>500</u> –
	Pb	<u>1,7</u> 0,51	<u>0,50</u> <0,02	<u>4,1</u> 2,8	<u>12,0</u> 0,34	<u>12,0</u> <0,02	<u>12,0</u> 0,80	<u>12,5</u> 0,52	<u>8,3</u> <0,02	<u>18</u> 3,5	<u>12</u> –

Примечание. В числителе – валовые содержания Me, в знаменателе – концентрации подвижных форм Me, мг/кг; прочерк – данные отсутствуют.

По результатам ФА для ПФ Ме в органогенных горизонтах почв заповедника превалирует породный фактор ($Ni_{97}Fe_{96}Cr_{94}Ti_{92}V_{74}$) с весом 46,1%. Практически сопоставимы органогенный фактор (26,7%), ответственный за накопление $Mn_{89}Zn_{89}Cd_{75}$ в почвах с хорошо развитой подстилкой, и фактор увлажнения почв ($\frac{Cu_{35}}{Ba_{98}Pb_{79}}$, 26,4%). Последний проявляется в аккумуляции Cu в торфяных олиготрофных почвах и Ba, Pb в подстилке подзолов иллювиально-железистых. На контрольных СМ выражены факторы пыления ($\frac{Cu_{10}Ba_{98}Zn_{10}}{Pb_{98}}$, 35,8%) и рудопроявления ($V_{97}Ti_{89}Cr_{80}Fe_{78}$ – 34,8%), в поверхностном слое выделяется комплексное загрязнение при освоении месторождения $Mn_{96}Cd_{94}Ni_{94}Zn_{48}Cr_{38}$ (29,3%).

В иллювиальных горизонтах фоновых СМ 50,9% дисперсии объясняется увеличением ПФ халькофилов и Ni ($\frac{Pb_{98}Cu_{98}Zn_{97}Cd_{96}Ni_{94}}{Ba_{97}}$) в торфяных олиготрофных почвах, а 46,9% – влиянием подстилающих горных пород ($Fe_{98}Mn_{98}Cr_{96}V_{95}Ti_{86}$). На контрольных СМ практически сопоставимы альфегумусовый ($Ni_{96}V_{94}Zn_{91}Cu_{86}Ba_{43}Pb_{40}Mn_{39}$ – 35,9%) и рудный ($Ti_{98}Cr_{95}Fe_{91}Mn_{91}$ – 34,9%) факторы. Пыление от карьеров (26,9%) отражает парагенезис $\frac{Cd_{48}Pb_{36}Cu_{36}}{Ba_{48}}$, компоненты которого типичны для пыли [Регионы..., 2014].

Биотестирование почв. Почвы заповедника не токсичны (рис. 2), за исключением олиготрофного торфяника на СМ 1 с высокой кислотностью (рН = 3,85). На территории комбината острая токсичность отмечена в пробах 11Т в 100 м от санитар-

но-защитной зоны (С33) и 40В вблизи сварочного класса. Токсичность почв уменьшается при продвижении вниз по почвенному профилю. Отличия составляют до 20% для смертности *D. magna* и до 40% для отклонений оптической плотности *C. vulgaris*.

Химический состав лишайников. На территории заповедника содержания изученных Ме соответствуют фону [Опекунова, Гизетдинова, 2014]. По сравнению с 2009–2011 гг. отмечено возрастание содержаний Fe, Mn в 4 раза, что может быть обусловлено как увеличением их выбросов при добыче и переработке железной руды, так и поступлением Ме при трансграничном переносе. Ранее на примере изменения химического состава снега было показано [Орекунов et al., 2021], что основная металльная нагрузка на территорию заповедника осуществляется при западном переносе с территории европейских стран. Увеличение содержания Fe и Mn в атмосферном воздухе может быть связано с загрязнением выхлопными газами автомобилей, содержащими в качестве антидетонационных присадок ферроцен и его производные. Вблизи комбината содержание Fe, Cr, Ni и V увеличивается на порядок; Sc, Co, Sr и Ba – в 5–10 раз; Cu и Pb – в 2–3 раза. Fe, Cr, Ni, V и Sc могут рассматриваться как ключевые Ме эмиссии со стороны горнопромышленных объектов. Отмечено возрастание зольности лишайников с 0,5–0,7% на фоновых СМ до 2,5–6,8% в С33 комбината, что согласуется с литературными данными [Thakur et al., 2024].

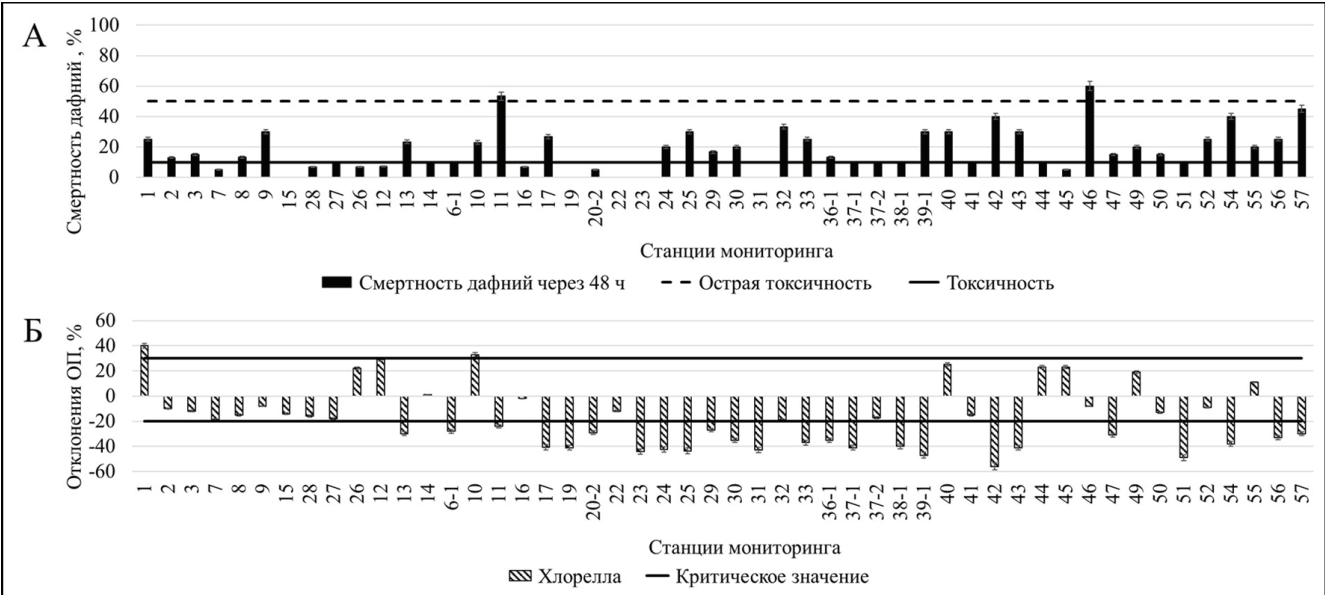


Рис. 2. Смертность *Daphnia magna* через 48 часов экспозиции (А) и изменение оптической плотности (ОП) *Chlorella vulgaris* (Б), органогенные горизонты

Fig. 2. Mortality of *Daphnia magna* after 48 hours of exposure (A) and deviations of *Chlorella vulgaris* optical density (B), organogenic horizons

Химический состав корки *Pinus sylvestris*.

В заповеднике концентрации Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V, Zn в 2–9 раз ниже кларков [Добровольский, 2003]. Содержание Cd превышает кларк в 5–6 раз (табл. 2). В условиях антропогенного загрязнения за счет увеличения pH почв уменьшается миграционная способность изученных Me и их биодоступность. В городе аэротехногенное загрязнение сопровождается увеличением в корке сосны концентраций Ni, Cr, сульфатов (в 2 раза по сравнению с фоном), Pb, Ti, Fe (4–8), V (14). На территории комбината выше фона концентрации Ti, Cr, Ni (3–4); V и Fe (8), типоморфных для железистых кварцитов [Пантелеева, 2009].

В фоновых условиях химический состав корки определяется, прежде всего, химическим составом горных пород, перераспределением Me в ландшафтно-геохимической катене при доминировании альфегумусового процесса и торфонакопления. На территории заповедника породный фактор имеет вес 40,6%. Парагенезис $Zn_{92}Cd_{89}Mn_{88}Fe_{87}$ (29,8%) связан с аккумуляцией Me органическим веществом почвы. Накопление в корке сосны элементов-спутников Fe отражает ассоциация $Ti_{98}V_{79}$ (16,3%). При аэротехногенном загрязнении в районе комбината и на территории города увеличивается доля Me антропогенного происхождения. Вес породного фактора ($Cr_{96}V_{89}Ni_{83}Cu_{71}Fe_{40}$) снижается до 32,3%. Аэротехногенное загрязнение представлено: загрязнением окружающей среды вблизи объектов горнорудного производства при добыче, транспортировке и первичной обработке руды ($Mn_{90}Zn_{88}Cd_{79}Ti_{77}Fe_{58}V_{37}Pb_{35}Cu_{34}$ – 31,0%), воздействием автотранспорта ($Pb_{89}Ba_{87}Cu_{35}Cd_{35}$ – 18,2%) и кислотосодержащими выбросами (SO_4 – 9,8%).

Морфологические характеристики *Pinus sylvestris*. В заповеднике возраст хвои сосны составляет 3–4 года, состояние – 2 балла; проективное покрытие (ПП) эпифитных лишайников – 30–95%. В городе возраст хвои незначительно снижается до 2–3 лет, состояние – до 3 баллов, ПП эпифитных лишайников составляет 15–40%. На территории комбината массово проявляется суховершинность деревьев, в 1,5–2,5 раза по сравнению с фоном снижаются возраст и состояние хвои (рис. 3А). ПП эпифитных лишайников сокращается в 3 раза в СЗЗ комбината по сравнению с фоном (23% против 72%), на отдельных СМ снижение на порядок – до 0–5%.

Доля тератоморфной пыльцы сосны варьирует от 10–12% на фоновых СМ до 40% на контрольных СМ. Выделено 11 типов нарушений (рис. 4): пыльцевые зерна (п. з.) с редуцированными пыльцевыми мешками (в среднем 3,5% пыльцы на СМ), с включениями (0,9), одномешковые (0,2), двухразномешковые (6,4), трех- (0,4) и четырехмешковые (0,1), сросшимися пыльцевыми мешками (0,3), п. з. без

содержимого (5,8), с нарушениями экзины (3,5), гигантские (0,5) и с редуцированным телом (2,2%).

Наибольшее количество тератоморфной пыльцы (30–40%) наблюдается на расстоянии 3–7 км от комбината (рис. 5А). Аналогичные закономерности выявлены для *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.: в заповеднике доля некрозов составляет 10%; на территории комбината – 33%, на расстоянии 7–10 км – 27%, на расстоянии более 11 км – <20% (см. рис. 5Б). Это обусловлено особенностями выпадения и пространственного распространения поллютантов, что подтверждает сделанные ранее выводы о зональности распределения загрязняющих веществ в импактной зоне [Федорец, Солодовников, 2013]. Доля тератоморфной пыльцы по мере удаления от комбината сначала возрастает, а затем снижается, в то время как процент талломов с некрозами закономерно уменьшается по мере удаления от комбината. По-видимому, наблюдаемые различия в ответной реакции организмов связаны с разной чувствительностью биоиндикационных признаков к воздействию разных поллютантов (металлов и сульфатов).

Дендрохронологические исследования. Радиальный прирост сосны составляет в среднем 1,36 мм/год и уменьшается с 2,04–2,61 мм/год в первые 10 лет жизни дерева до 0,5 мм/год в 90–100-летнем возрасте с дальнейшим уменьшением до 0,3 мм/год и менее. Это хорошо согласуется с представлением о том, что наиболее активный прирост характерен для первых 25–30 лет жизни дерева; далее приросты постепенно уменьшаются до 1,5 мм/год и происходит их стабилизация, так что в 60–70-летнем возрасте размер годовичного кольца редко превышает 1 мм [Edvardsson et al., 2022].

На контрольных СМ угнетение деревьев отмечено в конце 1970-х – начале 1980-х гг., в период строительства и первых лет работы комбината при наиболее выраженном комплексном преобразовании окружающей среды (рис. 6). На фоновых СМ, напротив, в указанные годы отмечено увеличение прироста, индексы выше в 1,5 раза по сравнению с контрольными СМ.

Химический состав листьев *Betula pubescens*. Концентрации Ba, Cd, Zn в листьях березы в заповеднике превышают кларки [Добровольский, 2003] в 2–8 раз; содержания Cu ниже кларков в 2 раза; Cr и Pb – в 11–12; Fe – в 20 раз; V и Ti – в 150 и 460 раз соответственно; для Ni и Mn соотношение близко к 1. В городе химический состав листьев в общем соответствует фону, однако возрастают концентрации Me группы Fe (Fe, Ti, V) в 3,5–7 раз. На комбинате увеличиваются относительно фона содержания Ti (в 18 раз), V (12), Fe (10), Cr (3), Ni (2) (см. табл. 2).

Таблица 2

Статистические параметры химического состава индикаторных видов растений

Параметры		Среднее min – max						Кларк [Добровольский, 2003]	
		Костомукшский заповедник		г. Костомукша		АО «Карельский окамыш»			
Корка <i>P. sylvestris</i>	<i>n</i>		7	<i>Ax</i>	3	<i>Ax</i>	33	<i>Ax</i>	
	Концентрация, мг/кг	Ba	<u>12,0</u> 2,4–29	0,07	<u>10,0</u> 7,8–11,4	0,07	<u>9,7</u> 2,9–23	0,05	22,5
		Cd	<u>0,20</u> <0,02–0,36	0,27	<u>0,21</u> 0,18–0,27	0,38	<u>0,09</u> <0,02–0,31	0,16	0,035
		Cr	<u>0,20</u> 0,11–0,67	0,02	<u>0,46</u> 0,43–0,51	0,04	<u>0,78</u> 0,29–4,0	0,03	1,8
		Cu	<u>2,3</u> 1,1–5,8	0,32	<u>2,9</u> 2,6–3,2	0,18	<u>2,4</u> 0,50–6,0	0,11	8,0
		Fe	<u>33</u> 23–45	0,01	<u>260</u> 214–350	0,02	<u>263</u> 47–830	0,01	300
		Mn	<u>75</u> 26–214	0,30	<u>39</u> 29–47	0,13	<u>29</u> 1,3–99	0,06	205
		Ni	<u>0,53</u> 0,31–1,2	0,09	<u>1,2</u> 0,89–1,6	0,09	<u>1,4</u> 0,40–3,7	0,05	2,0
		Pb	<u>0,43</u> <0,02–0,70	0,03	<u>1,7</u> 1,6–1,8	0,07	<u>0,34</u> <0,02–1,3	0,02	1,25
		Ti	<u>0,88</u> 0,40–2,2	–	<u>4,6</u> 3,9–5,1	–	<u>3,3</u> 0,83–9,7	–	32,5
		V	<u>0,17</u> 0,09–0,22	0,41	<u>2,4</u> 1,3–4,5	0,12	<u>1,3</u> 0,09–6,3	0,05	1,5
		Zn	<u>15,2</u> 9,8–23	0,41	<u>15,5</u> 13,3–16,7	0,25	<u>10,8</u> 2,1–31	0,20	30
		SO ₄	<u>68</u> 13,0–182	–	<u>157</u> 75–206	–	<u>72</u> 20–186	–	–
Листья <i>B. pubescens</i>	<i>n</i>		9	<i>Ax</i>	1	<i>Ax</i>	20	<i>Ax</i>	–
	Зольность, %		<u>4,7</u> 3,9–5,4	–	4,32	–	<u>6,2</u> 4,7–9,9	–	–
	Концентрация, мг/кг	Ba	<u>46</u> 15,0–63	0,28	28	0,20	<u>48</u> 14,0–99	0,26	22,5
		Cd	<u>0,29</u> 0,19–0,35	0,40	0,33	0,60	<u>0,28</u> 0,17–0,64	0,51	0,035
		Cr	<u>0,16</u> 0,03–0,52	0,02	0,10	0,01	<u>0,45</u> 0,10–2,4	0,02	1,8
		Cu	<u>3,8</u> 2,6–4,7	0,53	5,1	0,32	<u>4,1</u> 3,1–6,4	0,19	8,0
		Fe	<u>14,8</u> 10,0–22	0,01	50	0,01	<u>151</u> 23–727	0,01	300
		Mn	<u>150</u> 99–188	0,60	145	0,48	<u>173</u> 98–391	0,38	205
		Ni	<u>1,9</u> 0,60–4,2	0,31	2,3	0,18	<u>4,2</u> 1,6–10,6	0,16	2,0
		Pb	<u>0,11</u> 0,10–0,15	0,01	0,10	0,01	<u>0,11</u> 0,10–0,20	0,01	1,25
		Ti	<u>0,07</u> 0,02–0,12	–	0,48	–	<u>1,4</u> 0,04–8,0	–	32,5
		V	<u><0,02</u> <0,02–<0,02	0,01	0,04	0,01	<u>0,12</u> <0,02–0,55	0,01	1,5
		Zn	<u>156</u> 129–185	4,22	172	2,82	<u>153</u> 101–223	2,89	30

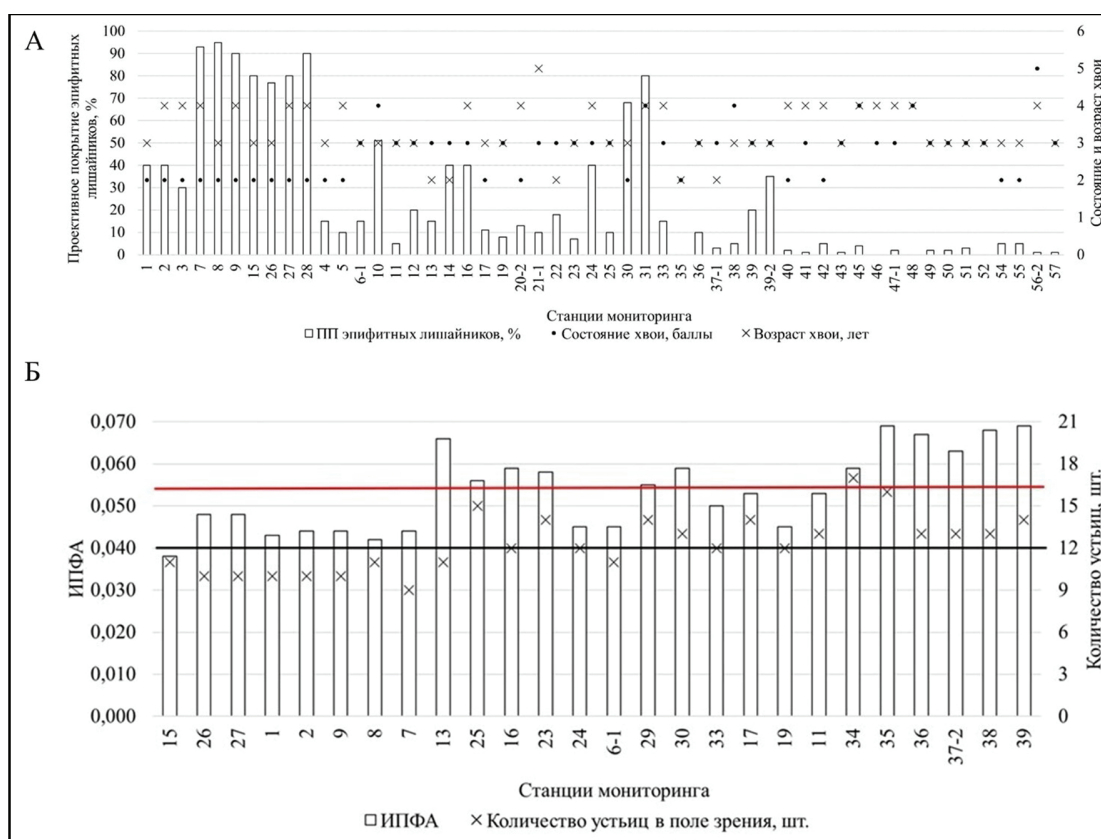


Рис. 3. Изменение биоиндикационных характеристик *Pinus sylvestris* (А) и *Betula pubescens* (Б). Черной линией обозначена граница между I и II баллами ИПФА листьев березы, красной линией – критическая ситуация, V баллов ИПФА

Fig. 3. Changes in bioindication characteristics of *Pinus sylvestris* (A) and *Betula pubescens* (Б). Black line is the boundary between I and II points of the fluctuating asymmetry of birch leaves, red line is the boundary of critical situation (V point of the fluctuating asymmetry)

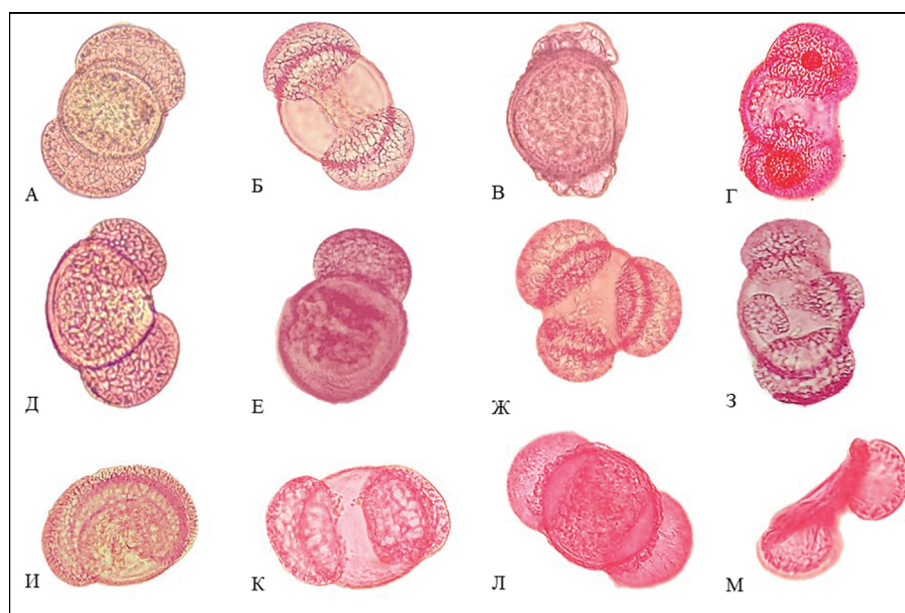


Рис. 4. Типы пыльцевых зерен *Pinus sylvestris*: А, Б – нормально развитое п. з.; В – редуцированные п. м.; Г – п. з. с включениями; Д – двухразномешковое п. з.; Е – одномешковое п. з.; Ж – трехмешковое п. з.; З – четырех мешковое п. з.; И – сросшиеся п. м.; К – п. з. без содержимого; Л – нарушения экзины; М – редуцированное п. з.

Fig. 4. Types of pollen grains (p. g.) of *Pinus sylvestris*: А, Б – normally developed p. g.; В – reduced pollen sacs; Г – p. g. with inclusions; Д – two-bag p. g.; Е – one-bag p. g.; Ж – three-bag p. g.; З – four-bag p. g.; И – fused pollen sacs; К – p. g. without contents; Л – disorders of the exine; М – reduced p. g.

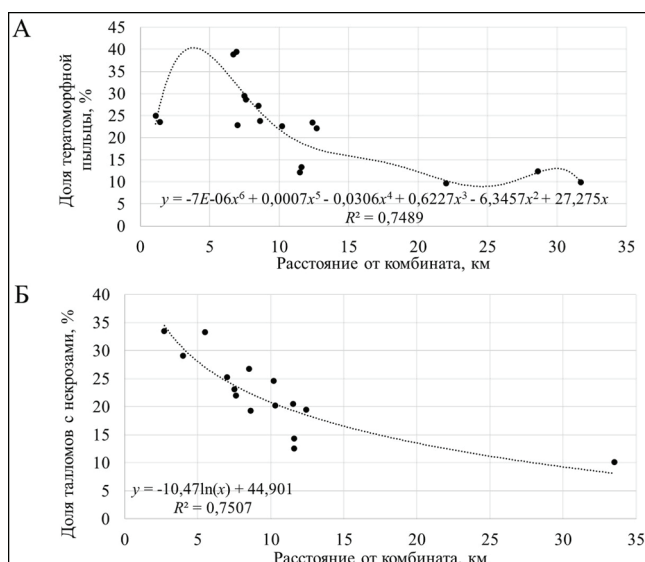


Рис. 5. Доля тератоморфной пыльцы (А) и талломов *Hypogymnia physodes* с некрозами (Б) на разном удалении от комбината

Fig. 5. The proportion of teratomorphic pollen (A) and *Hypogymnia physodes* thallomas with necrosis (B) at different distances from the plant

По результатам ФА ассоциация $Zn_{94}Cu_{83}$ отражает химический состав минеральной части хлоропластов, противоположные нагрузки имеет парагенезис $Pb_{96}Ni_{75}$, проявляющийся в неблагоприятных условиях. Ni замещает центральный Mg в молекуле хлорофилла [Zvezdanovic et al., 2023], Pb блокирует места связывания элементов минерального питания [Битюцкий, 2020]. В заповеднике вес фактора достигает 55,8%; на территории комбината, где у деревьев проявляются нарушения метаболизма, Me входят в состав одной ассоциации, вес фактора снижается до 32,6%. В связи с аэротехногенным загрязнением при добыче и обогащении руды влияние фактора подстилающих горных пород увеличивается с 24,1% ($Ti_{97}Fe_{85}$) в заповеднике до 38,6% на комбинате ($Fe_{98}Cr_{97}V_{97}Ti_{95}Pb_{64}$). Около 27,7–30,5% дисперсии приходится на концентрирование $\frac{Ba_{87}}{Cd_{97}Mn_{97}}$ листьями вследствие поступления этих Me с пылью [Регионы..., 2014].

Морфологические показатели листьев *Betula pubescens*. На территории заповедника ИПФА соответствует I и II классам, а на барьере «суша-вода» – III классу с ИПФА = 0,048. В г. Костомукша ИПФА = 0,066 – критическое отклонение. На комбинате ИПФА варьирует от 0,045 до 0,069, из них 62% проб отнесены к V классу (см. рис. 3Б).

Антропогенная трансформация природной среды приводит к увеличению числа устьиц на эпидермисе листа березы: с 9–11 шт. в заповеднике, до 11–15 шт. в СЗЗ и 13–17 шт. на комбинате. Наибольшая корреляционная связь изменения морфологических показателей отмечается с металлами-инди-

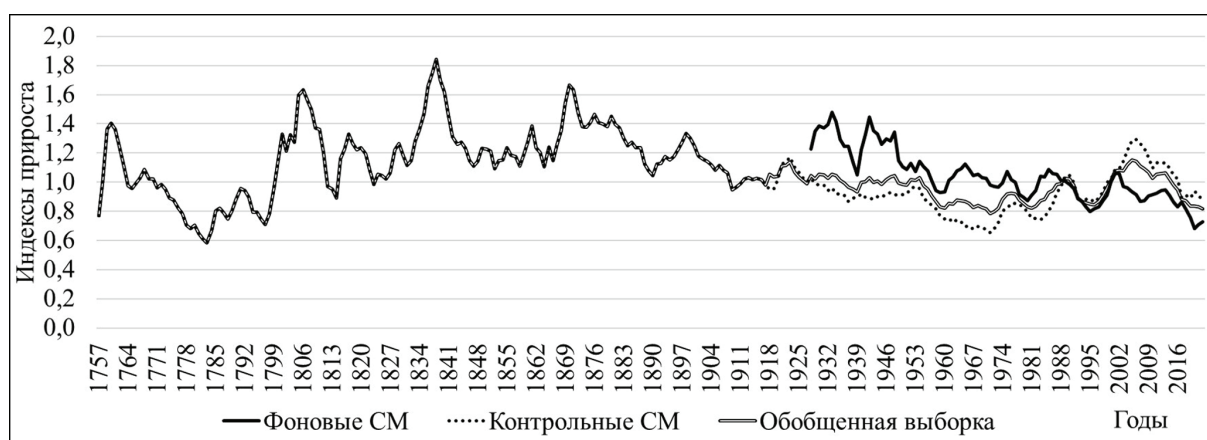
каторами рудопроявления: Fe ($r = 0,65$ для ИПФА и $r = 0,49$ для количества устьиц; $r_{кр} = 0,36$ при $p = 0,05$), V (0,65 и 0,55), Ti (0,62 и 0,51), Cr (0,54 и 0,37), Ni (0,52 и 0,44 соответственно). Это еще раз подчеркивает необходимость изучения морфологических показателей растений совместно с химическим анализом для достоверной индикации состояния окружающей среды.

Анализ значений коэффициентов биологического поглощения (см. табл. 2) указывает на уменьшение интенсивности накопления Cu, Mn, Zn (в 1,6–5 раз) в корке сосны и Cu, Ni, Zn (1,5–3) в листьях березы на контрольных СМ по сравнению с фоном. Перечисленные Me активно накапливаются в почве и в гораздо меньших количествах поступают в растения. Напротив, активно концентрируются в корке сосны рудные Me: Fe, V, Cr (Ах выше фона в 1,6–5 раз). Вх свидетельствует об активном вовлечении в техногенезе в биогеохимический круговорот Cu (3,5–3,6 для корки сосны и 3,6–3,8 для листьев березы) и Fe (2–12 и 3–5 соответственно). Сравнение полученных коэффициентов указывает на более интенсивную аккумуляцию Ba, Cd, Cu, Mn, Ni, Zn (Ах и Вх больше в 1,5–14 раз) в листьях березы по сравнению с коркой сосны. Fe (1,7–5), Pb (3–17), V (11–60) лучше накапливаются в корке сосны. Перечисленные закономерности связаны с биологическими особенностями растений и должны учитываться при биоиндикационных исследованиях.

Биоразнообразие растений. В заповеднике нарушенность растительного покрова связана с пожарами различной давности и зарастанием территории хуторов, на которых до середины XX в. осуществлялась распашка земель, а также формированием рудеральных сообществ по обочинам дорог.

На территории г. Костомукша хорошо сохранились северотаежные массивы лесов, которые не были трансформированы градостроительными работами. На нарушенных участках отмечено формирование рудерально-крупнотравных группировок с *Rubus idaeus* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.

Коренные лесные фитоценозы, оставленные на территории комбината, претерпевают существенную трансформацию. Помимо типичных лесных видов в состав сообществ здесь активно внедряются гелиофиты и сорняки: *Fragaria vesca* L., *Melandrium dubium* Hampe ex Garcke, *Urtica dioica* L., *Calamagrostis arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Tussilago farfara* L., *Picris hieracioides* L. с обилием до сор₂. В условиях низкой конкуренции на нарушенных местообитаниях появляются виды орхидных, свойственные естественным местообитаниям – *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo, *Platanthera bifolia* (L.) Rich. Высокой степенью преобразован-

Рис. 6. Обобщенные хронологии радиального прироста *Pinus sylvestris*Fig. 6. Generalized chronologies of the radial growth of *Pinus sylvestris*

ности отличаются березняки – вторичные фитоценозы, формирующиеся на месте коренных еловых лесов. В травяно-кустарничковом ярусе березняков произрастают типичные таежные виды – *Vaccinium vitis-idaea* L., *V. myrtillus* L., *V. uliginosum* L., *Luzula pilosa* (L.) Willd., растения-индикаторы начальных стадий заболачивания (*Equisetum sylvaticum* L.) и чрезмерного увлажнения (*Eq. palustre* L., по краю болота); травы, характерные для нарушенных местообитаний – *Solidago virgaurea* L., *Festuca ovina* L. и др. с обилием сор₁ и ПП до 10%.

На насыпных грунтах по окраинам производственных площадок и подъездных путей встречаются разрозненные группировки апохорных и рудеральных видов: *Antennaria dioica* (L.) Gaertn., *Arctium tomentosum* Mill., *Barbarea vulgaris* R. Br., *Plantago major* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg., *Trifolium pratense* L., *T. repens* L., *Vicia cracca* L. и др.

Свежие рекультивированные отвалы зарастают рудеральными видами, фрагменты корневищ которых были перенесены с торфом. ПП травяно-кустарничкового яруса не превышает 5–10%, обилие – сол; жизненность снижается до 1–2 баллов. На доминирующие позиции выходят *Chamaenerion angustifolium* и *Tussilago farfara* с обилием sp-сор₁.

На рекультивированных отвалах 30-летней давности формируются березовые сообщества с преобладанием апохорных и рудеральных видов, инвазивных *Ribes nigrum* L., *Frangula alnus* Mill., *Melandrium dubium*. ПП травяно-кустарничкового яруса достигает 50%. Мохово-лишайниковый ярус с ПП 10% находится в начальной стадии развития, присутствуют типичные северотаежные мхи: *Dicranum undulatum* Schrad. ex Brid., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al. На склонах отвалов напочвенный покров имеет куртинообразный характер и приурочен к защищенным участкам с аккумуляцией мелкозема.

Расчет *BIP* показал, что на фоновых СМ выраженная трансформация природной среды отсутствует (табл. 3, рис. 7), на контрольных СМ уровень нагрузки оценивается как «средний» (*BIP* = 0,37–0,63) с локальными отклонениями до «высокого» (*BIP* = 0,28–0,37). На большинстве контрольных СМ значения *BIP* в 2,5–3 раза меньше фона. Наименьшие *BIP* отмечены вблизи производственных площадок: СМ 10 в 120 м от границы СЗЗ (*BIP* = 0,33), СМ 29 на северной оконечности Обводного канала (0,39), СМ 35 на западном отвале (0,28).

Среди частных показателей наименьшей вариативностью и, следовательно, эффективностью характеризуются морфологические показатели *Pinus sylvestris* и *Betula pubescens*. Значительной изменчивостью отличаются концентрации ПФ Ме в почвах, подчеркивающие возрастание подвижности Ме в техногенезе [Hou et al., 2019], а также химический состав листьев *B. pubescens* и корки *P. sylvestris*. Выраженное загрязнение окружающей среды отмечено на СМ 10 в 120 м от границы СЗЗ: частные *BIP* составляют 0,37 для валового содержания Ме и 0,62 для ПФ в органогенном горизонте; 0,01 – для ПФ в иллювиальном горизонте, а также 0,48 и 0,28 для листьев березы и корки сосны соответственно. На территории комбината выражено изменение химического состава листьев березы (*BIP* для листьев уменьшается до 0,03), корки сосны (до 0,37), возрастание концентраций ПФ Ме в почвах (0,27). Особенно ярко это проявляется в районе западного отвала (СМ 34–39).

ВЫВОДЫ

Выявлено загрязнение окружающей среды, индикаторами которого являются превышения фона валового содержания Fe, V и Ni в аккумулятивных и иллювиальных горизонтах почв; Fe, Ni, V и Sc в лишайниках; Fe, Cr, Ni, V, Ti, Pb в листьях березы;

увеличение подвижности Me в почвах. Поступление поллютантов от технологических процессов приводит к концентрированию в коре сосны Mn, Zn, Cd, Ti, Fe, Ni, V, Pb, Cu (в 2,6–8 раз по сравнению с фоном); при загрязнении от автотранспорта возрастают в 1,5–4 раза содержания Pb, Ba, Cu, Cd.

Таблица 3

Средние значения частных (покомпонентных) и интегрального биоиндикационного показателей

Показатели	Фоновые СМ	Контрольные СМ
Валовое содержание Me в органогенных горизонтах почв	0,81 (0,70–0,92)	0,62 (0,37–0,80)
Валовое содержание Me в иллювиальных горизонтах почв	0,81 (0,75–0,83)	0,64 (0,60–0,71)
Подвижные формы Me в органогенных горизонтах почв	0,81 (0,62–0,92)	0,65 (0,05–0,88)
Подвижные формы Me в иллювиальных горизонтах почв	0,81 (0,67–0,94)	0,64 (0,01–0,89)
Биотестирование почв	0,83 (0,75–0,92)	0,72 (0,51–0,92)
Химический состав лишайников	0,80 (0,80–0,80)	0,29 (0,13–0,39)
Химический состав корки <i>Pinus sylvestris</i>	0,81 (0,73–0,88)	0,55 (0,25–0,86)
Морфологические отклонения <i>Pinus sylvestris</i>	0,81 (0,73–0,86)	0,68 (0,59–0,79)
Химический состав листьев <i>Betula pubescens</i>	0,81 (0,78–0,84)	0,53 (0,03–0,77)
Морфологические отклонения листьев <i>Betula pubescens</i>	0,80 (0,79–0,80)	0,75 (0,70–0,79)
Интегральный показатель <i>BIP</i>	0,81 (0,77–0,84)	0,60 (0,28–0,75)

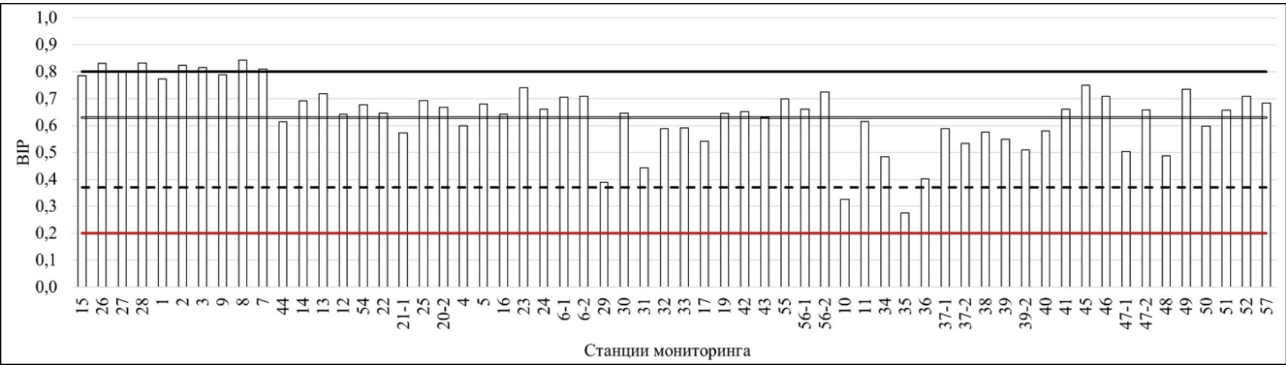


Рис. 7. Значения интегрального биоиндикационного показателя *BIP* на СМ: 0,80–1,0 – химическое загрязнение отсутствует; 0,63–0,80 – низкий уровень загрязнения; 0,37–0,63 – средний уровень загрязнения; 0,20–0,37 – высокий уровень загрязнения; <0,2 – чрезвычайно высокий уровень химического загрязнения

Fig. 7. Values of the integral bioindication parameter *BIP* at monitoring stations: 0,80–1,0 – no chemical pollution; 0,63–0,80 – low pollution degree; 0,37–0,63 – average pollution degree; 0,20–0,37 – high pollution degree; <0,2 – extremely high degree of chemical pollution

Биотестирование отразило возрастание токсичности почв по мере приближения к производственным объектам, автодорогам, локальным свалкам. Характерной особенностью почв на территории комбината является выраженная токсичность по всему почвенному профилю (горизонты О и В), нередко с возрастанием токсичности в иллювиальном горизонте.

Наличие тератов и изменение биоиндикационных характеристик сосны (ПП эпифитных лишайников; возраст и состояние хвои; возраст, диаметр и радиальный прирост деревьев и др.) указывают на изменение окружающей среды на контрольных СМ. Наибольшее влияние аэротехногенных

выбросов на тератогенез *Pinus sylvestris* и некроз *Hypogymnia physodes* проявляется на расстоянии 3–7 км от комбината. Прослеживается тенденция увеличения числа устьиц и возрастание ИПФА при приближении к комбинату. Установлена общая тенденция к уменьшению радиального прироста сосен в 1,5–3 раза относительно средних многолетних значений начиная с 1960-х гг., вызванная влиянием климатических факторов. С 1978–1982 гг. климатический сигнал на контрольных СМ подавляется антропогенным воздействием.

На нарушенных участках отмечено увеличение видового разнообразия сосудистых растений за

счет внедрения в состав фитоценозов рудеральных видов. Изменение видового разнообразия связано, прежде всего, с вырубками различной давности. Вторичные сукцессии сопровождаются инвазией рудеральных видов, широко представленных по обочинам грунтовых дорог и распространяющихся на территорию сплошной рубки.

Изученные биоиндикаторы характеризуются разной степенью информативности. Наиболее показательным изменением химического состава почв и растений под влиянием техногенеза. Морфологические характеристики листьев березы, пыльцы и годичных колец сосны подвержены значительным флуктуациям под влиянием природных факторов, что осложняет применение их для диагностики состояния окружающей среды и индикации антропогенных нарушений. Однако совместное использование биогеохимических и морфологических показателей, расчет интегрального биоиндикационного показателя *BIP* позволяет уточнить реакцию биоты на внешнее воздействие и более детально оценить состояние окружающей среды.

Результаты исследований подчеркивают необходимость проведения регулярного экологическо-

го мониторинга, включающего оценку биоразнообразия и химического состава компонентов среды. На нарушенной территории с целью сохранения биоразнообразия необходимо принять меры, препятствующие распространению рудеральных видов растений (например, их скашивание до образования семян), и проводить комплексную рекультивацию земель с применением аборигенных видов растений, типичных для фоновых местообитаний. Приоритетными древесными породами для восстановления лесных массивов на отвалах являются сосна обыкновенная *P. sylvestris* и береза пушистая *B. pubescens*. В состав травосмесей, используемых для газонов по обочинам дорог и вблизи цехов предприятия, должны входить только местные луговые виды, такие как *Poa pratensis*, *P. annua*, *Festuca ovina*, *F. rubra*, *Agrostis tennuis*, *A. vulgaris*, *Trifolium pratense*, *T. repens* и др. Сочетание сохранившихся фрагментов еловых лесов, а также формирование сосновых, березовых и луговых сообществ на рекультивированных участках позволит максимально сохранить и поддерживать естественное биоразнообразие на территории предприятия и СЗЗ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР по договору № 01/1-55-69-СПбГУ между СПбГУ и объединенной дирекцией государственного природного заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баргалы Р. Биогеохимия наземных растений. М.: ГЕОС, 2005. 457 с.
- Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / под ред. Р. Шуберта. М., 1988. 350 с.
- Битюцкий Н.П. Минеральное питание растений: учебник. 2-е изд. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2020. 540 с.
- Ваганов Е.А., Круглов В.Б., Васильев В.Г. Дендрохронология: учеб. пособие. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2008. 120 с.
- Галахина Н.Е. Оценка воздействия предприятий горнодобывающей железорудной промышленности на водную среду с учетом природно-техногенных факторов формирования вод: дис. ... канд. хим. наук. Петрозаводск, 2016. 160 с.
- Дзюба О.Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 197 с.
- Добровольский В.В. Основы биогеохимии: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2003. 400 с.
- Здоровье среды: методика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000. 68 с.
- Карташев А.Г. Биоиндикационные методы контроля окружающей среды: учеб. пособие. Москва: Юрайт, 2021. 138 с.
- Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Сорокина О.И. и др. Геохимия ландшафтов Улан-Батора // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2013. № 5. С. 109–124.
- Лянгузова И.В. Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 269 с.
- Методы физико-химического анализа почв и растений: метод. указания / М.Г. Опекунова и др. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2015. 86 с.
- Минкина Т.М., Вардуни Т.В., Манджиева С.С. и др. Индикация химического загрязнения почв и растений. Ростов н/Д: Печатная лавка, 2015. 192 с.
- Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Интегральная оценка загрязнения ландшафта с использованием функции желательности Харрингтона // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. Геология. География. 2014. № 4. С. 101–113.
- Опекунова М.Г. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации: дисс. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23. СПб., 2013. 402 с.
- Опекунова М.Г., Гизетдинова М.Ю. Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2014. № 1. С. 79–94.
- Опекунова М.Г., Никулина А.Р., Смешко И.В. и др. Сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды в Санкт-Петербурге // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2023. Т. 68. № 2. С. 331–356. DOI: 10.21638/spbu07.2023.207.
- Пантелеева Я.Г. Геохимические изменения окружающей среды в зоне влияния горнопромышленного комплек-

- са ОАО «Карельский окатыш» (г. Костомукша, Республика Карелия): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2009. 240 с.
- Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 560 с.
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Кренке А.Н. и др. Изменения биологической продуктивности наземных экосистем Российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 1. С. 30–41. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41.
- Требования к геохимической основе государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (новая редакция). М., 2005. 28 с.
- Федорец Н.Г., Солодовников А.Н. Воздействие эмиссий Костомукшского горно-обогатительного комбината на лесные подстилки сосняков в северотаежной подзоне Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 6. С. 143–152.
- Ярмишко В.Т., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Баккал И.Ю. Экологический мониторинг лесных экосистем Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения // Региональная экология. 2011. № 1-2(31). С. 21–29.
- Agboola O., Babatunde D.E., Fayomi O.S.I. et al. A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management, *Results in Engineering*, 2020, vol. 8, DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100181.
- Bayouli I.T., Bayouli H.T., Dell'Oca A. et al. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment, *Ecological Indicators*, 2021, vol. 125, no. 6, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107508.
- Capozzi F., Giordano S., Aboal J.R. et al. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: A systematic evaluation in three European countries, *Environmental Pollution*, 2016, vol. 214, p. 362–373, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.04.043.
- Edvardsson J., Rognvaldsson K., Helgadottir E.P. et al. A statistical model for the prediction of the number of sapwood rings in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), *Dendrochronologia*, 2022, vol. 74, no. 2, DOI: 10.1016/j.dendro.2022.125963.
- Fares M.A., Yusoff Z., Masdar N.D. et al. Tree barks as bioindicator for organic and inorganic pollutants: a preliminary study, *Jurnal Intelek*, 2014, vol. 9(1), p. 16–22.
- Giljum S., Maus V., Kuschnig N. et al. A pantropical assessment of deforestation caused by industrial mining, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119(38), 7 p., DOI: 10.1073/pnas.2118273119.
- Hou S., Zheng N., Tang L. et al. Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area, *Environ Monit Assess*, 2019, vol. 191, no. 10, p. 634, DOI: 10.1007/s10661-019-7793-5.
- Katjutin P.N., Stavrova N.I., Gorshkov V.V. et al. Radial growth of trees differing in their vitality in the middle-aged scots pine forests in the Kola Peninsula, *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, no. 3, p. 1–10, DOI: 10.14214/SF.10263.
- Korobova E.M. Toxicity as a Biogeochemical Problem, *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 10, p. 1092–1096, DOI: 10.1134/S0016702920100080.
- Li S., Wu J., Huo Y. et al. Profiling multiple heavy metal contamination and bacterial communities surrounding an iron tailing pond in Northwest China, *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 752, no. 2, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141827.
- Markert B. Plants as Biomonitors: Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment, VCH Publishers Ltd, 1993.
- Opekunov A.Y., Opekunova M.G., Kukushkin S.Y. et al. Mineralogical-Geochemical Characteristics of the Snow Cover in Areas with Mining and Ore-Processing, *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 7, p. 711–724, DOI: 10.1134/S0016702921060070.
- Rybicki J., Abrego N., Ovaskainen O. Habitat fragmentation and species diversity in competitive communities, *Ecology letters*, 2019, vol. 23, no. 3, p. 506–517, DOI: 10.1111/ele.13450.
- Speer J.H. Fundamentals of tree-Ring Research, Tucson, Arizona University of Arizona Press, 2010, 368 p.
- Stavrova N.I., Gorshkov V.V., Katjutin P.N., Bakka I.I. The structure of northern siberian spruce-scots pine forests at different stages of post-fire succession, *Forests*, 2020, vol. 11, no. 5, p. 558, DOI: 10.3390/F11050558.
- Terekhova V.A. Biotesting of Soil Ecotoxicity in Case of Chemical Contamination: Modern Approaches to Integration for Environmental Assessment (a Review), *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, no. 5, p. 601–612, DOI: 10.1134/S106422932205009X.
- Thakur M., Bhardwaj S., Kumar V. et al. Lichens as effective bioindicators for monitoring environmental changes: A comprehensive review, *Total Environment Advances*, 2024, vol. 9, DOI: 10.1016/j.teadv.2023.200085.
- Urosevic M.A., Lazo P., Stafilov T. et al. Active biomonitoring of potentially toxic elements in urban air by two distinct moss species and two analytical techniques: a pan-South-eastern European study, *Air Qual, Atmos, Health*, 2023, vol. 16, p. 595–612, DOI: 10.1007/s11869-022-01291-z.
- Zamotaev I.V., Ivanov I.V., Mikheev P.V. et al. Transformation and contamination of soils in iron ore mining areas (a review), *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 3, p. 359–372, DOI: 10.1134/S1064229317030127.
- Zvezdanovic J., Petrovic S., Lazarevic A. Nickel(II) interactions with chlorophylls in solution: impact to degradation induced by UV-irradiation, *Chemia Naissensis*, 2023, vol. 5, no. 2, p. 1–17, DOI: 10.46793/ChemN5.2.01Z.

Поступила в редакцию 08.11.2024

После доработки 14.02.2025

Принята к публикации 12.03.2025

BIOINDICATION OF THE STATE OF THE ENVIRONMENT IN THE IRON ORE PRODUCTION AREA

M.G. Opekunova¹, A.R. Nikulina², I.S. Gaidysh³, I.V. Kushnir⁴, V. Prokhorova⁵

^{1, 2, 4, 5} Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Geoecology

³ Joint Directorate of the Kostomuksha State Nature Reserve and the Kalevala National Park

¹ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: m.opekunova@mail.ru

² Graduate student; e-mail: anna.2001-nik@mail.ru

³ Deputy Director for research, environmental education and environmental monitoring,
Ph.D. in Biology; e-mail: isgaydysh@gmail.com

⁴ Graduate student; e-mail: sakhalin.ira.sakh@gmail.com

⁵ Undergraduate student; e-mail: LeraLaneige03@mail.ru

The article analyzes the transformation of environmental components in the impact region of the JSC Karelian Pellet, Republic of Karelia. The content of metals (Mn, K, Sc, V, Sr, Fe, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Cd, Ba, Pb and Ti) in soils, bark of *Pinus sylvestris* and leaves of *Betula pubescens* was measured, and the changes in anatomical and morphological characteristics of indicator species were studied. The natural and territorial complexes in the Kostomuksha Nature Reserve were taken as a background. It is shown that the chemical composition of soils and plants depends on that of the underlying rocks, specific features of ore occurrence and the intensity of peat accumulation. When dusting from quarries, the soils receive K, Sr, Ba, Fe, Mn and Ti. Pollution from motor vehicles is an agent of increasing concentrations of Pb, Zn, Cu and Cd in soils and plants. Biotesting on *Daphnia magna* and *Chlorella vulgaris* have shown a low level of soil toxicity. Application of a set of bioindicating parameters revealing even minor environmental changes proved to be the most demonstrative one. Morphological deviations of plants under the influence of pollution increase by 1.5–4 times, the projective cover of epiphytic lichens decreases to zero compared with the background. The climatic signal in the radial growth of *P. sylvestris* is suppressed by anthropogenic impact within the plant area, the minimum and maximum growth indices decrease by 1.5–3 times relative to the background. The *bioindication integral parameter* (BIP) based on the Harrington's desirability function indicates the absence of pollution in the reserve (BIP = 0.77–0.84), and "average" (BIP = 0.37–0.63) and "high" (BIP = 0.28–0.37) degree of environment transformation near production facilities within the plant territory. The outskirts of roads, production sites, and cuttings are overgrown with apochoric and ruderal species, such as *Urtica dioica*, *Calamagrostis arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Tussilago farfara*, *Picris hieracioides*, etc. Invasive *Ribes nigrum*, *Frangula alnus*, *Melandrium dubium*, etc. occur widely within the reclaimed areas of old dumps of overburden grounds. The need for regular monitoring and control of the content of metals, especially Fe, Ni, V, Pb, Cu and Zn, in environmental components within the impact area of iron ore enterprises was noted.

Keywords: chemical composition of soils and plants, bioindicators, anatomical and morphological indicators of transformation, *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens*, biotesting

Acknowledgements. The study was carried out under the contract 01/1-55-69-SPbGU between the SPbGU and the Joint Directorate of the Kostomuksha State Nature Reserve and the Kalevala National Park.

REFERENCES

- Agboola O., Babatunde D.E., Fayomi O.S.I. et al. A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management, *Results in Engineering*, 2020, vol. 8, DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100181.
- Bargal'i R. *Biogeokhimiya nazemnykh rastenii* [Biogeochemistry of terrestrial plants], Moscow, GEOS, 2005, 457 p. (In Russian)
- Bayouli I.T., Bayouli H.T., Dell'Oca A. et al. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment, *Ecological Indicators*, 2021, vol. 125, no. 6, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107508.
- Bioindikatsiya zagryaznenij nazemnykh ekosistem* [Bioindication of pollution of the terrestrial ecosystems], R. Schubert (ed.), Moscow, 1988, 350 p. (In Russian)
- Bityutskii N.P. *Mineral'noe pitanie rastenii: uchebnik* [Mineral nutrition of plants: textbook], 2nd ed., St. Petersburg, Publ. House of St. Petersburg Univ., 2020, 540 p. (In Russian)
- Capozzi F., Giordano S., Aboal J.R. et al. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: A systematic evaluation in three European countries, *Environmental Pollution*, 2016, vol. 214, p. 362–373, DOI 10.1016/j.envpol.2016.04.043.
- Dobrovolskii V.V. *Osnovy biogeokhimii, ucheb. dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenii* [Fundamentals of biogeochemistry, Textbook for students], Moscow, Akademiya Publ., 2003, 400 p. (In Russian)
- Dzyuba O.F. *Palinoindikatsiya kachestva okruzhayushchei sredy* [Palinoindication of environmental quality], St. Petersburg, Nedra Publ., 2006, 197 p. (In Russian)
- Edvardsson J., Rognvaldsson K., Helgadottir E.P. et al. A statistical model for the prediction of the number of sapwood rings in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), *Den-*

- drochronologia*, 2022, vol. 74, no. 2, DOI: 10.1016/j.dendro.2022.125963.
- Fares M.A. Yusoff Z., Masdar N.D. et al. Tree barks as bioindicator for organic and inorganic pollutants: a preliminary study, *Jurnal Intelek*, 2014, vol. 9(1), p. 16–22.
- Fedorets N.G., Solodovnikov A.N. Vozdeistvie emissii Kostomukshskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata na lesnye podstilki sosnyakov v severotaezhnoi podzone Karelii [Impact of the Kostomuksha Mining and Processing Plant emissions on the forest litters in pine forests of the Northern Taiga subzone of Karelia], *Trudy KarNTs RAN*, 2013, no. 6, p. 143–152. (In Russian)
- Galakhina N.E. *Otsenka vozeistviya predpriyatii gornodobyvayushchei zhelezorudnoi promyshlennosti na vodnyuyu sredu s uchetom prirodno-tekhnogennykh faktorov formirovaniya vod* [Assessment of the impact of mining enterprises of the iron ore industry on the aquatic environment, taking into account natural and man-made factors of water formation], Dissertation for the degree of Candidate of Chemical Sciences, Petrozavodsk, 2016, 160 p. (In Russian)
- Giljum S., Maus V., Kuschnig N. et al. A pantropical assessment of deforestation caused by industrial mining, In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119(38), 7 p. DOI: 10.1073/pnas.2118273119.
- Hou S., Zheng N., Tang L. et al. Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area, *Environ Monit Assess*, 2019, vol. 191, no. 10, p. 634, DOI: 10.1007/s10661-019-7793-5.
- Kartashev A.G. *Bioindikatsionnye metody kontrolya okruzhayushchei sredy, ucheb. posobie* [Bioindication methods of the environment monitoring, textbook], Moscow, Yurajt Publ., 2021, 138 p. (In Russian)
- Katjutin P.N., Stavrova N.I., Gorshkov V.V. et al. Radial growth of trees differing in their vitality in the middle-aged scots pine forests in the Kola Peninsula, *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, no. 3, p. 1–10, DOI 10.14214/SF.10263.
- Korobova E.M. Toxicity as a Biogeochemical Problem, *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 10, p. 1092–1096, DOI: 10.1134/S0016702920100080.
- Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Sorokina O.I. et al. Geokhimiya landshaftov Ulan-Batora [Geochemistry of Ulaanbaatar landscapes], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Seriya geograficheskaya*, 2013, no. 5, p. 109–124. (In Russian)
- Li S., Wu J., Huo Y. et al. 2021. Profiling multiple heavy metal contamination and bacterial communities surrounding an iron tailing pond in Northwest China, *Science of the Total Environment*, vol. 752, no. 2, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141827.
- Lyanguzova I.V. *Tyazhelye metally v severotaezhnykh ehkositemakh Rossii*, Saarbrücken, LAP LAMBERT, 2016, 269 p.
- Markert B. *Plants as Biomonitors: Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment*, VCH Publishers Ltd., 1993.
- Metody fiziko-khimicheskogo analiza pochv i rastenii, metod. ukazaniya* [Methods of physical-chemical analysis of soils and plants, methodical instructions], M.G. Opekunova et al., St. Petersburg, Izd-vo S.-Peterb. Un-ta, 2015, 86 p. (In Russian)
- Minkina T.M., Varduni T.V., Mandzhieva S.S. et al. *Indikatsiya himicheskogo zagryazneniya- pochv i rastenij* [Indication of chemical pollution of soil and plants], Rostov-na-Donu, Pechatnaya-lavka Publ., 2015, 192 p. (In Russian)
- Opekunov A.Y., Opekunova M.G., Kukushkin S.Y. et al. Mineralogical-Geochemical Characteristics of the Snow Cover in Areas with Mining and Ore-Processing, *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 7, p. 711–724, DOI: 10.1134/S0016702921060070.
- Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Integral'naya otsenka zagryazneniya landshafta s ispol'zovaniem funktsii zhelatel'nosti Kharringtona [Total evaluation of landscape pollution using Harrington's desirability function], *Vestn. SPb. un-ta, Ser. Geologiya, Geografiya*, 2014, no. 4, p. 101–113. (In Russian)
- Opekunova M.G. *Diagnostika tekhnogennoy transformatsii landshaftov na osnove bioindikatsii* [Bioindication-based diagnostics of the technogenic transformation of landscapes], diss. ... d-r geogr. Nauk, 25.00.23, SPb., 2013, 402 p. (In Russian)
- Opekunova M.G., Gizetdinova M.Yu. Ispol'zovanie lishainikov v kachestve bioindikatorov zagryazneniya okruzhayushchei sredy [Using of lichens as bioindicators of environmental pollution], *Vestn. SPb. un-ta, Ser. 7, Geologiya, Geografiya*, 2014, no. 1, p. 79–94. (In Russian)
- Opekunova M.G., Nikulina A.R., Smeshko I.V., Kirichenko V.S. Sravnitel'nyi analiz effektivnosti metodov bioindikatsii pri monitoringovykh issledovaniyakh sostoyaniya okruzhayushchei sredy v Sankt-Peterburge [Comparative analysis of the effectiveness of bioindication methods in monitoring environmental studies in St. Petersburg], *Vestn. SPb. un-ta, Nauki o Zemle*, 2023, vol. 68, no. 2, p. 331–356, DOI: 10.21638/spbu07.2023.207. (In Russian)
- Panteleeva Ya.G. *Geokhimicheskie izmeneniya okruzhayushchei sredy v zone vliyaniya gornopromyshlennogo kompleksa OAO "Karel'skii okatysh" (g. Kostomuksha, Respublika Kareliya)* [Geochemical changes of the environment in the zone of influence of the Karelian Okatysh mining complex (Kostomuksha, Republic of Karelia)], Extended Abstract of PhD Thesis in Geological and Mineral Sciences, St. Petersburg, 2009, 240 p. (In Russian)
- Regiony i goroda Rossii: integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya* [Regions and cities of Russia: integrated assessment of the environmental condition], N.S. Kasimov et al., Moscow, IP Filimonov M.V. Publ., 2014, 560 p. (In Russian)
- Rybicki J., Abrego N., Ovaskainen O. Habitat fragmentation and species diversity in competitive communities, *Ecology letters*, 2019, vol. 23, no. 3, p. 506–517, DOI: 10.1111/ele.13450.
- Speer J.H. *Fundamentals of Tree-Ring Research*, Tucson, Arizona University of Arizona Press, 2010, 368 p.
- Stavrova N.I., Gorshkov V.V., Katjutin P.N., Bakka I.I. The structure of northern siberian spruce-scots pine forests at different stages of post-fire succession, *Forests*, 2020, vol. 11, no. 5, p. 558, DOI 10.3390/F11050558.
- Terekhova V.A. Biotesting of Soil Ecotoxicity in Case of Chemical Contamination: Modern Approaches to Integration for Environmental Assessment (a Review), *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, no. 5, p. 601–612, DOI: 10.1134/S106422932205009X.
- Thakur M., Bhardwaj S., Kumar V., Rodrigo-Comino J. Lichens as effective bioindicators for monitoring environmental changes: A comprehensive review, *Total Environment Advances*, 2024, vol. 9, DOI: 10.1016/j.teadva.2023.200085.

- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Krenke A.N. et al. *Izmeneniya biologicheskoy produktivnosti nazemnykh ehkossistem rossijskoj Arktiki v XXI v.* [Changes in the biological productivity of terrestrial ecosystems of the Russian Arctic in the 21st century], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 30–41, DOI 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41. (In Russian)
- Trebovaniya k geokhimicheskoi osnove gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 1 000 000 (novaya redaktsiya)* [Requirements for the geochemical basis of the state geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 1 000 000 (new edition)], Moscow, 2005, 28 p. (In Russian)
- Urosevic M.A., Lazo P., Stafilov T. et al. Active biomonitoring of potentially toxic elements in urban air by two distinct moss species and two analytical techniques: a pan-Southeastern European study, *Air Qual, Atmos, Health*, 2023, vol. 16, p. 595–612, DOI 10.1007/s11869-022-01291-z.
- Vaganov E.A., Kruglov V.B., Vasil'ev V.G. *Dendrokronologiya: uchebnoe posobie* [Dendrochronology: textbook], Krasnoyarsk, Siberian Federal Univ. Publ., 2008, 120 p. (In Russian)
- Yarmishko V.T., Gorshkov V.V., Lyanguzova I.V., Bakkal I.Yu. Ehkologicheskij monitoring lesnykh ehkossistem Kol'skogo poluostrova v usloviyakh aehrotekhnogen-nogo zagryazneniya, *Regional'naya ekologiya*, 2011, no. 1–2(31), p. 21–29. (In Russian)
- Zamotaev I.V., Ivanov I.V., Mikheev P.V. et al. Transformation and contamination of soils in iron ore mining areas (a review), *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 3, p. 359–372, DOI: 10.1134/S1064229317030127.
- Zdorov'e sredi: metodika otsenki* [Environmental health: assessment methodology], V.M. Zakharov et al., Moscow, Tsentr ekologicheskoi politiki Rossii Publ., 2000, 68 p. (In Russian)
- Zvezdanovic J., Petrovic S., Lazarevic A. Nickel(II) interactions with chlorophylls in solution: impact to degradation induced by UV-irradiation, *Chemia Nais-sensis*, 2023, vol. 5, no. 2, p. 1–17, DOI: 10.46793/ChemN5.2.01Z.

Received 08.11.2024

Revised 14.02.2025

Accepted 12.03.2025