

Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината

В. В. ЕРШОВ¹, Н. В. ЛУКИНА², М. А. ОРЛОВА², Л. Г. ИСАЕВА¹, В. Э. СМИРНОВ^{2,3}, Т. Т. ГОРБАЧЕВА¹

¹ *Институт проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ КНЦ РАН
184209, Апатиты, ул. Академгородок, 14а
E-mail: Slavo91@gmail.com*

² *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14
E-mail: lukina@cepl.rssi.ru*

³ *Институт математических проблем биологии РАН – филиал ИПМ им. М. В. Келдыша РАН
142290, Пущино, ул. Профессора Виткевича, 1
E-mail: vestimirov@gmail.com*

Статья поступила 14.03.2018

После доработки 01.07.2018

Принята к печати 02.07.2018

АННОТАЦИЯ

Проведена оценка динамики состава почвенных вод хвойных лесов, формирующихся под влиянием атмосферных выбросов медно-никелевого комбината “Североникель” в Мурманской обл. Объекты исследований представляют собой наиболее распространенные в бореальной зоне ельники кустарничково-зеленомошные и сосняки кустарничково-лишайниковые. Полученные результаты показали значительное внутри- (подкروновые и межкروновые пространства) и межбиогеоценотическое (еловые и сосновые леса) варьирование состава атмосферных выпадений и почвенных вод в лесах, подверженных аэротехногенному загрязнению. Выпадения приоритетных поллютантов из атмосферы и вынос их соединений с почвенными водами из всех генетических горизонтов в десятки (сульфаты) и в сотни (тяжелые металлы) раз выше, чем на фоновой территории, причем их размеры в подкроновых пространствах, как правило, выше, чем в межкроновых. Многолетняя динамика (с 1993 по 2012 г.) показывает достоверные тренды снижения концентраций и выноса основных поллютантов. Показатель молярного отношения основных катионов к алюминию (BC/Al) в почвенных водах из всех горизонтов не опускается до уровня критических нагрузок, тогда как по минеральному азоту самый нижний критический уровень (0,2 мг/л), как правило, превышен, в водах из всех горизонтов на всех стадиях дигрессии. Для раннего выявления превышений критического уровня концентраций минерального азота в почвенных водах на всех стадиях дигрессии необходима оценка их состава в подкроновых пространствах.

Ключевые слова: хвойные леса, техногенные дигрессии, атмосферные выпадения, почвенные воды, тяжелые металлы, сульфаты, химические индикаторы, пространственное варьирование, многолетняя динамика.

Атмосферное промышленное загрязнение – основной негативный фактор, который оказывает губительное воздействие на леса. Самым мощным в Северной Европе источником воздушного промышленного загрязнения в XX в. являлись предприятия АО “Кольская горно-металлургическая компания” (КГМК) ПАО “ГМК Норильский никель”. Однако, согласно отчетности по площадке Мончегорск КГМК за 2012 г., компания в течение восьми лет соблюдает норматив предельно допустимых выбросов. Это способствовало снижению выбросов основных поллютантов по площадке Мончегорск за 1990–2011 гг.: SO₂ (тыс. т) – с 232,5 до 31,3 (в 7,4 раза); Cu (т/год) – с 1813 до 483,5 (в 3,7 раза); Ni (т/год) – с 2712 до 344,8 (в 7,8 раза) (данные АО “Кольская ГМК”).

Основными поллютантами, оказывающими негативное воздействие на лесные биогеоценозы Кольского Севера, являются кислотообразующие соединения серы и азота, а также тяжелые металлы (никель, медь, кобальт, свинец, кадмий, хром и др.) [Лукина, Никонов, 1996; Reinmann et al., 1997; Steinnes et al., 2000; Derome, Lukina, 2010; Цветков В. Ф., Цветков И. В., 2012; Kashulina et al., 2014]. Загрязнение оказывает как непосредственное (фумигация, выщелачивание), так и косвенное (изменение состава и свойств почв и почвенных вод, снижение устойчивости к болезням и т. д.) влияние на леса. Почва региона – важнейший компонент лесной экосистемы, в котором функционируют эффективные барьеры на пути нисходящей внутрипрофильной миграции поллютантов в ее органогенные и иллювиальные горизонты [Лукина, Никонов, 1996; Лукина и др., 2008; Копчик и др., 2016]. Почвенные воды являются информативной матрицей для оценки негативного воздействия поллютантов на лесные экосистемы. Одним из активно развивающихся подходов к такой оценке является концепция критических нагрузок [Nilsson, Grennfelt, 1988], которые рассчитываются с помощью химических индикаторов, предлагаемых, в том числе, для состава почвенных вод. К таким индикаторам относятся молярное отношение основных катионов и алюминия (Ca + Mg + K/Al), рекомендованное для оценки процессов подкисления почв, а также концентрация минерального азота,

позволяющие давать оценки уровня эвтрофикации [Svedrup, Warfvinge, 1993; Копчик, 2004].

Оценка состава атмосферных выпадений и почвенных вод в лесах фоновых территорий на Кольском полуострове после резкого снижения техногенных нагрузок в 2002–2008 гг. показала значительное внутри- и межбиогеоценотическое варьирование химических индикаторов [Lukina et al., 2018].

Цели данной статьи: сравнить состав атмосферных выпадений и почвенных вод лесов, сформированных в условиях высокого уровня аэротехногенного загрязнения, и лесов в фоновых условиях на основе многолетних данных; оценить состав атмосферных выпадений и почвенных вод в хвойных лесах Кольского полуострова на разных стадиях техногенной дигрессии лесов, используя международные химические индикаторы, с учетом внутри- и межбиогеоценотического пространственного варьирования и многолетней динамики.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили почвенные воды в ельниках кустарничково-зеленомошных и сосняках лишайниковых на разных стадиях дигрессии. Почвы на объектах исследования представлены альфегумусовыми подзолами. Пробные площади (ПП) находились на разном удалении от источника загрязнения – комбината “Североникель”: 7–10 км – стадии соснового и елового техногенного редколесья, 28–31 км – дефолирующие леса и более 100 км – фоновая территория [Лукина, Никонов, 1996; Lukina, Nikonov, 2003].

Тип доминирующих сообществ на фоновой территории представлен ельниками кустарничково-зеленомошными и сосняками зеленомошно-лишайниково-кустарничковыми, полнота древостоя 0,5 и 0,4 соответственно. Средний возраст древостоя ели в фоновых условиях – 200–220 лет, сосны – 160–180 лет, продолжительность жизни хвои ели достигает 13–14 лет, хвои сосны – 7–8 лет. Дефолирующие леса представлены ельниками злаково-кустарничковыми и сосняками лишайниково-кустарничковыми [Лукина, Нико-

нов, 1996] с полнотой древостоя 0,4 и 0,3, в которых средний возраст ели – 220–240 лет, сосны – 80–100 лет, а продолжительность жизни хвои ели снижается по сравнению с фоном до 7–9 лет, хвои сосны – до 3–5 лет. Стадия техногенного редколесья представлена елово-березовыми вороничными и сосновыми кустарничковыми редколесьями с полнотой древостоя 0,1 и 0,2 соответственно; средний возраст ели – 100–120 лет, сосны – 80–100 лет, продолжительность жизни хвои ели в период высокого уровня загрязнения не превышала 3–5 лет, хвои сосны – 2–3 лет. Доля мертвых деревьев (сухостой, бурелом, валеж) в еловых лесах увеличивается с 6 % в фоновых условиях, до 20 % в дефолирующих лесах и 80 % в техногенных редколесьях, а в сосновых лесах от 6 % в фоне до 10 и 60 % в дефолирующих лесах и редколесьях соответственно. Каждая ПП оборудована шестью осадкоприемниками для дождевых выпадений (3 – под кронами, 3 – между крон). Снег отбирали в конце марта – начале апреля в период максимального снегонакопления, дождевые выпадения и почвенные воды – ежемесячно с начала мая по начало октября. Каждая ПП оснащена лизиметрами гравитационного типа (12 шт. на ПП), расположенными на разной глубине в соответствии с генетическими горизонтами почв (A0, E, Bhfa, BC/C) и с учетом мозаичной структуры биогеоценоза (под кронами и между крон) [Лукина, Никонов, 1996, 1998]. Используемые гравитационные лизиметры конструкции Дж. Дерома оказывают наименее деструктивное влияние на функционирование лесов и рекомендованы для применения в международной программе ICP Forests [Nieminen et al., 2013].

Образцы вод фильтровали через бумажный фильтр “синяя лента”. Показатель pH определяли потенциометрически, металлы – методом ААС (AAnalyst 800), нитраты и сульфаты – методом ионообменной хроматографии. Хроматограф выполнен в виде двух отдельных блоков: насоса (Water 501 HPLC Pump фирма Millipore2) и детектора (Waters 431 Conductivity Detector, фирма Millipore). Качество анализов почвенных вод и атмосферных выпадений подтверждается регулярным успешным участием ЦКП ИППЭС в

международных межлабораторных сравнительных испытаниях качества химических анализов. Норматив погрешности определения анионов, в том числе методом ионообменной хроматографии, установлен в соответствии с Руководством [Manual..., 2010]: для NO_3^- – от 5 до 21 %, SO_4^{2-} – от –3 до 36 %. Аммонийный азот определяли по методу Къельдаля [Mahera et al., 2002].

Для характеристики состава атмосферных выпадений использовали данные за период с 1999 по 2012 г., для почвенных вод с 1995 по 2012 г. С 2000 г. по данным АО “Кольская ГМК” наблюдается снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [www.pornik.ru].

Для почвенных вод рассчитывали молярные отношения $(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K})/\text{Al}$ и концентрацию минерального азота как сумму нитратного и аммиачного азота в мг/л.

Расчет описательных статистик проводили в Microsoft Excel 2007. В той же программе эмпирически подбирали тренды для оценки многолетней динамики атмосферных выпадений и выноса с почвенными водами соединений тяжелых металлов. Значимость трендов оценивалась в программе Biomstat 4.11 [Sokal, Rohlf, 2012] по p -значению, ассоциированному с F -статистикой, т. е. отношением объясненной регрессионной моделью дисперсии к необъясненной. Для сравнения стадий дигрессии применяли критерий Манна – Уитни и программу Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Состав атмосферных выпадений в форме снега

В фоновых еловых и сосновых лесах (табл. 1) выпадения соединений серы со снегом в подкрупных пространствах (ПК) достоверно выше ($p < 0,05$), чем в межкрупных пространствах (МК), что можно объяснить интенсивными обменными процессами на поверхности хвои, а также смывом пыли с кроны, которая обладает большой сорбирующей способностью. Достоверных внутрибиогеоценологических различий для pH и тяжелых металлов не обнаружено. Межбиогеоценологические различия также оказались недо-

Т а б л и ц а 1

**Кислотность и содержание меди, никеля (мг/м²) и сульфатной серы (г/м²) в атмосферных выпадениях
(среднее за период 1999–2012 гг.)**

Стадии дигрессии	Осадки	Еловые леса				Сосновые леса			
		pH	Ni	Cu	S- SO ₄ ²⁻	pH	Ni	Cu	S- SO ₄ ²⁻
Под кронами деревьев									
Фон	Дождь	4,05*	1	2	0,58	4,16	0,4	1	0,19
		0,05**	0,1	0,2	0,10	0,05	0,1	0,2	0,03
	Снег	4,53	0,1	0,2	0,04	4,54	0,1	0,1	0,02
		0,07	0,02	0,1	0,003	0,09	0,01	0,02	0,002
Дефолирующие леса	Дождь	3,54	39	39	1,40	3,57	30	31	1,02
		0,04	5	6	0,17	0,03	3	7	0,09
	Снег	4,28	6	5	0,13	4,29	2	1	0,06
		0,05	1	1	0,01	0,07	0,3	0,1	0,004
Техногенное редколесье	Дождь	3,51	305	266	1,97	3,67	96	118	0,91
		0,04	38	31	0,22	0,05	11	25	0,09
	Снег	4,30	63	31	0,19	4,34	30	13	0,13
		0,06	9	5	0,02	0,06	3	2	0,01
Между крон деревьев									
Фон	Дождь	5,16	0,1	0,6	0,07	4,91	0,1	0,5	0,09
		0,10	0,03	0,1	0,01	0,09	0,03	0,1	0,02
	Снег	4,60	0,1	0,2	0,03	4,60	0,1	0,1	0,02
		0,08	0,01	0,03	0,003	0,09	0,01	0,01	0,003
Дефолирующие леса	Дождь	4,49	1	1	0,17	4,40	1	1	0,16
		0,08	0,2	0,1	0,02	0,05	0,2	0,1	0,02
	Снег	4,50	3	2	0,08	4,50	1	1	0,05
		0,06	0,3	0,3	0,01	0,08	0,2	0,1	0,003
Техногенное редколесье	Дождь	4,00	24	18	0,49	4,10	5	3	0,33
		0,03	4	4	0,06	0,05	1	2	0,07
	Снег	4,48	25	9	0,09	4,55	18	7	0,09
		0,06	4	1	0,01	0,07	2	1	0,005

*Среднее значение.

**Стандартная ошибка.

стоверными ($p > 0,05$). Многолетняя динамика выпадений поллютантов показывает достоверный тренд к снижению в еловых лесах меди – от 0,48 до 0,05 мг/м² ($R^2 = 0,51$), никеля – от 0,2 до 0,05 мг/м² ($R^2 = 0,57$) и серы – от 238 до 95 мг/м² ($R^2 = 0,39$) под кронами. В сосновых лесах тенденция снижения наблюдается только для серы – от 126 до 39 мг/м² ($R^2 = 0,37$). В межкрупных пространствах тенденцию снижения можно наблюдать для выпадений никеля в ельнике – от 0,12 до 0,08 мг/м² ($R^2 = 0,39$), никеля – от 0,2 до 0,08 мг/м² ($R^2 = 0,32$) и меди – от 0,24 до 0,06 мг/м² ($R^2 = 0,35$) в сосняке, для серы тенденция снижения не обнаружилась.

В дефолирующих еловых и сосновых лесах по сравнению с фоном выпадения основных поллютантов со снегом существенно возрастают: никеля – до 60 раз, меди до – 20 раз и сульфатной серы – до 3 раз, как в ПК, так и МК.

Выпадения соединений основных поллютантов со снегом в ПК сосновых и еловых лесов до 2 раз выше, чем в МК, а кислотность в ПК достоверно выше, что связано со смывом кислотообразующих веществ с крон деревьев. Выпадения основных поллютантов в ПК еловых лесов в 2–5 раз выше, чем сосновых, что можно объяснить более высокой сорбирующей способностью полога

ели из-за протяженной и плотной кроны, в МК достоверные межбиогеоценоотические различия между ельниками и сосняками не обнаружены.

Многолетняя динамика выпадений показала снижение в МК выпадений меди – от 5 до 0,43 мг/м² ($R^2 = 0,5$), никеля – от 7 до 0,54 мг/м² ($R^2 = 0,45$) и серы – от 188 до 148 мг/м² ($R^2 = 0,32$) в ельнике, а также меди – от 1,9 до 0,66 мг/м² ($R^2 = 0,52$) и серы – от 220 до 142 мг/м² ($R^2 = 0,57$) в сосняке. Под кронами тенденций к снижению не наблюдается ни в еловых, ни сосновых лесах.

В техногенных еловом и сосновом редколесьях выпадения со снегом никеля до 600 раз, меди – до 140 раз, сульфатной серы – до 5 раз выше, чем на фоновой территории [Ershov et al., 2016].

Выпадения тяжелых металлов и серы со снегом в еловых и сосновых лесах в ПК в 2–3 раза выше, чем в МК. Кислотность, так же как и в дефолирующих лесах, достоверно выше в ПК. По сравнению с выпадениями в сосновых лесах, в еловых лесах выпадения меди и никеля в ПК выше в 2 раза, а в МК выше выпадения никеля – в 1,4 раза. Многолетняя динамика выпадений меди, никеля и серы со снегом в еловых и сосновых редколесьях не показывает отчетливых внутрибиогеоценоотических различий из-за высокой вариабельности.

Состав атмосферных выпадений в форме дождя

В фоновых еловых и сосновых лесах (см. табл. 1) выпадения тяжелых металлов и сульфатов с дождем и со снегом под кронами деревьев значительно выше (от 2 до 8 раз), чем между кронами. В ПК показатель рН в дождевых выпадениях достоверно ($p < 0,05$) ниже, чем в МК.

Многолетняя динамика демонстрирует снижение выпадений соединений меди между крон только в ельниках – от 0,26 до 0,07 мг/м² ($R^2 = 0,48$) Для никеля и серы достоверные изменения в многолетней динамике не установлены.

Следует отметить и межбиогеоценоотические различия в выпадениях тяжелых металлов под кронами: в сосновых лесах их выпадения до 1,7 раза, а для сульфатов до 3 раз

ниже, чем в еловых. В МК в сосновых лесах выпадения никеля – в 1,4 раза ниже по сравнению с еловыми.

В дефолирующих еловых и сосновых лесах выпадения основных поллютантов с дождем значительно превышают фоновые: никеля – до 76 раз, меди – до 24 раз и сульфатов – до 5 раз.

Выпадения соединений этих элементов с дождем в ПК в 6–40 раз выше, чем в МК (табл. 2), так же как и кислотность ($p < 0,05$). Так же, как в фоновых условиях, выражены межбиогеоценоотические различия: выпадения соединений основных поллютантов в ПК в сосновых лесах до 1,5 раза ниже, чем в еловых лесах. В МК достоверных различий не обнаружено. Многолетняя динамика выпадений основных поллютантов с дождем показывает тренд к снижению меди в МК еловых лесов, и тренд к снижению меди и никеля в ПК сосновых лесов (рис. 1; см. табл. 2).

В техногенных еловых и сосновых редколесьях выпадения с дождем никеля – до 450 раз, меди – до 130 раз, сульфатной серы – до 5 раз выше, чем на фоновой территории.

Т а б л и ц а 2
Оценка значимости многолетних трендов динамики тяжелых металлов, значения p

Стадия дигрессии	Никель	Медь
Атмосферные выпадения в форме дождя		
Дефолирующие еловые леса	Нд*	0,001
Дефолирующие сосновые леса	0,039	0,002
Еловые редколесья	Нд	Нд
Сосновые редколесья	0,002	0,0005 0,005
Вынос с почвенными водами из органогенных горизонтов		
Фоновые еловые леса	0,002	0,059 0,004
Фоновые сосновые леса	0,0005	0,0004 0,0001
Дефолирующие еловые леса	0,0022	0,004 0,025
Дефолирующие сосновые леса	Нд	Нд
Еловые редколесья	0,009	>0,0001 0,001
Сосновые редколесья	Нд	0,0008

* Нд – не достоверно.

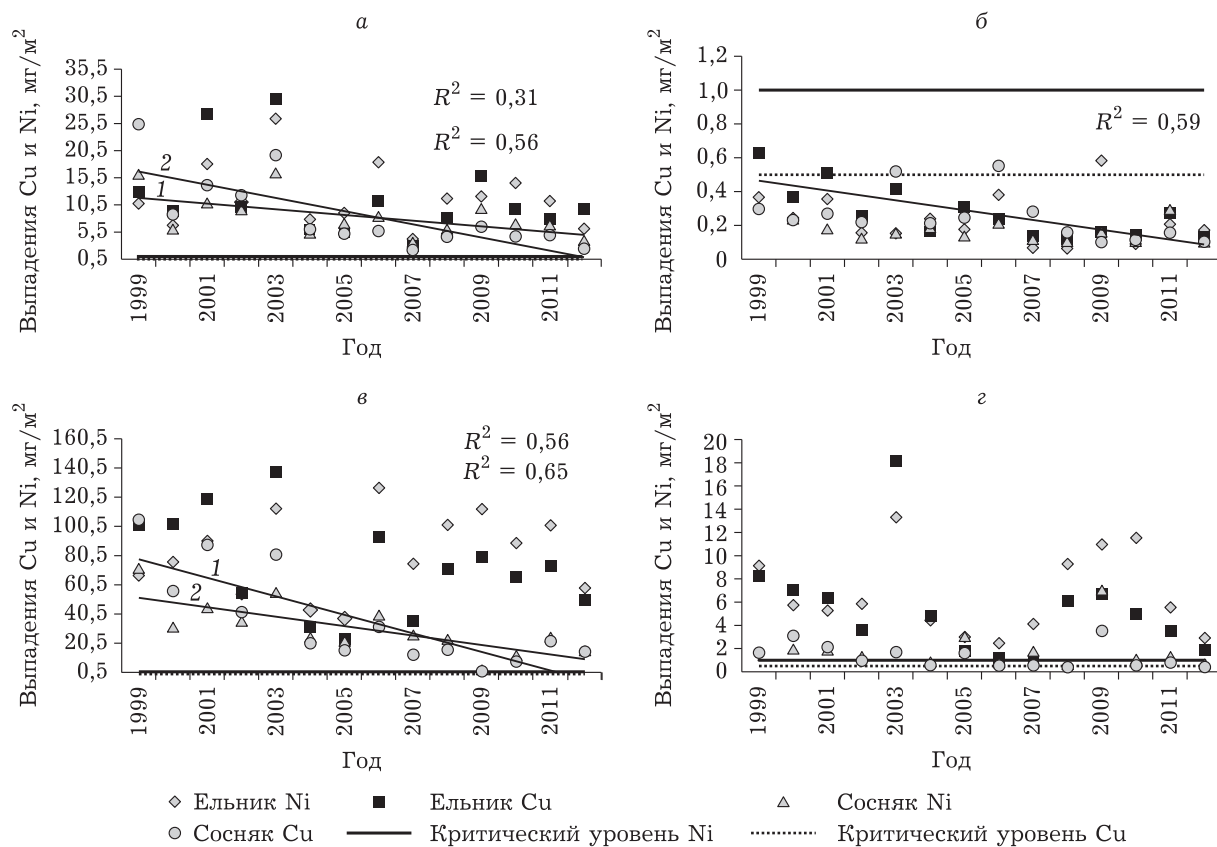


Рис. 1. Многолетние атмосферные выпадения никеля и меди с дождем. Дефолилирующие леса: а – под кронами и б – между крон, редколесья: в – под кронами и г – между крон

Так же как и на других стадиях, выпадения с дождем в ПК в 2–39 раз выше, а показатель рН ниже, чем в МК. В сосновых лесах выпадения тяжелых металлов до 6 раз и сульфатов до 2 раз достоверно ниже, чем в еловых, как в ПК, так и МК. Многолетняя динамика выпадений сульфатов, никеля и меди с дождем демонстрирует наиболее ярко выраженное снижение выпадений никеля и меди в сосновых лесах в ПК (см. рис. 1).

Таким образом, атмосферные выпадения на всех стадиях дигрессии характеризуются значительным внутри- и межбиогеоценоотическим варьированием. Выпадения существенно выше в ПК по сравнению с МК, и в еловых лесах по сравнению с сосновыми.

Характеристика состава почвенных вод

Пространственная внутрибиогеоценоотическая вариабельность состава почвенных вод. В лизиметрических водах еловых и сосновых лесов, формирующихся в фоновых

условиях, отобранных из всех горизонтов почв (табл. 3), концентрации основных поллютантов в ПК достоверно выше ($p < 0,05$), чем в МК, что связано с их поступлением с кроновыми водами и более высокими концентрациями этих соединений в почвах под кронами [Лукина, Никонов, 1996]. Исключение составляет медь в почвенных водах еловых лесов из Е + В и ВС горизонтов почв: внутрибиогеоценоотические различия здесь не достоверны ($p > 0,05$). В водах из всех горизонтов почв в ПК еловых лесов кислотность достоверно ниже ($p < 0,05$), чем в МК, за исключением вод из ВС горизонтов. Это объясняется более высокой концентрацией кальция в кроновых водах и в почвах под кронами елей, что связано с тем, что опад хвои ели богат кальцием. Еще одним объяснением является то, что плотная и низкая крона ели задерживает значительное количество атмосферных осадков, что препятствует интенсивному выносу оснований из органогенных горизонтов [Лукина и др., 2008]. В сосновых

Кислотность, содержание меди, никеля, сульфатов, показателя ВС/А1, показателя N_{min} в почвенных водах еловых и сосновых лесов, мг/л

Тип состояния	Глубина	Еловые леса						Сосновые леса						
		pH	Ni	Cu	SO ₄ ²⁻	BC/A1	N _{min}	pH	Ni	Cu	SO ₄ ²⁻	BC/A1	N _{min}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Фон	A0	4,39*	0,004	0,01	6,78	26,68	0,64	3,66	0,003	0,01	2,57	8,78	0,42	
		0,063**	0,0004	0,001	0,57	1,64	0,06	0,039	0,0002	0,001	0,23	0,62	0,06	
	E + B	5,01	0,002	0,01	4,61	11,64	0,24	4,17	0,002	0,01	2,46	2,14	0,30	
		0,11	0,0003	0,002	0,39	1,39	0,03	0,04	0,0002	0,001	0,19	0,21	0,03	
	BC	4,99	0,002	0,01	7,80	34,15	0,16	4,69	0,002	0,004	6,03	16,41	0,28	
		0,09	0,0002	0,001	0,63	8,16	0,03	0,07	0,0002	0,001	0,29	2,64	0,04	
	Дефолирующие леса	A0	3,53	0,23	0,26	28,16	22,76	0,27	3,64	0,02	0,02	6,54	10,88	0,22
			0,02	0,02	0,02	1,91	1,40	0,02	0,02	0,002	0,001	0,41	0,68	0,02
		E + B	3,91	0,13	0,04	24,51	3,90	0,21	4,53	0,01	0,01	8,79	21,48	0,28
			0,03	0,01	0,003	1,53	0,55	0,03	0,10	0,001	0,001	0,46	5,20	0,05
BC		4,29	0,06	0,01	14,75	7,36	0,28	4,54	0,06	0,02	11,52	13,12	0,22	
		0,05	0,01	0,002	1,08	0,54	0,05	0,08	0,01	0,004	0,90	1,68	0,05	
Редколесье		A0	3,79	1,26	1,11	31,44	12,18	0,37	3,62	1,13	0,68	22,74	16,55	0,28
			0,04	0,11	0,13	2,06	0,83	0,09	0,04	0,09	0,06	1,43	0,92	0,04
E+B		BC	4,42	0,94	0,16	17,36	21,99	0,70	4,06	0,62	0,16	17,24	7,82	0,24
			0,04	0,08	0,02	1,15	3,86	0,17	0,04	0,05	0,02	1,00	0,88	0,03
Фон	A0	4,06	0,62	0,16	17,24	7,82	0,24	4,18	0,72	0,17	19,54	14,23	0,33	
		0,04	0,05	0,02	1,00	0,88	0,03	0,04	0,07	0,02	1,50	0,81	0,05	
Между крон деревьев	A0	4,19	0,001	0,01	0,96	14,98	0,54	3,89	0,002	0,01	1,00	11,69	0,49	
		0,05	0,0001	0,001	0,08	1,46	0,08	0,05	0,0002	0,001	0,13	0,94	0,04	
	E + B	4,59	0,001	0,005	2,96	8,42	0,25	4,41	0,001	0,01	1,11	3,44	0,26	
		0,07	0,0001	0,001	0,23	1,84	0,04	0,08	0,0001	0,001	0,12	0,73	0,03	
	BC	4,73	0,001	0,01	4,23	51,43	0,16	5,04	0,001	0,01	1,75	6,57	0,22	
		0,10	0,0001	0,001	0,44	19,81	0,03	0,11	0,000	0,001	0,27	0,92	0,06	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Дефолирующие леса	A0	3,86	0,06	0,03	6,95	13,31	0,20	4,13	0,02	0,03	3,17	11,97	0,32
	E + B	0,04	0,005	0,002	0,64	2,58	0,02	0,04	0,002	0,002	0,32	1,47	0,04
	BC	4,41	0,01	0,01	5,50	7,71	0,21	4,75	0,01	0,01	3,79	18,83	0,15
Редколесье		0,06	0,002	0,003	0,23	0,78	0,02	0,06	0,001	0,001	0,26	1,76	0,02
		4,44	0,02	0,01	7,47	9,90	0,21	4,70	0,003	0,004	4,07	38,44	0,20
		0,05	0,002	0,001	0,40	1,20	0,03	0,07	0,001	0,001	0,29	6,49	0,03
	A0	4,05	0,84	0,20	21,40	15,68	0,60	4,18	0,30	0,12	14,41	18,16	0,32
	E + B	0,04	0,07	0,02	1,75	1,29	0,11	0,03	0,02	0,01	0,95	0,90	0,04
		4,42	0,47	0,04	13,64	12,87	0,73	4,59	0,27	0,05	10,68	33,48	0,18
		0,04	0,05	0,01	0,91	2,14	0,16	0,05	0,02	0,01	0,50	8,62	0,02
	BC	4,55	0,55	0,01	10,98	44,32	2,66	-	-	-	-	-	-
		0,04	0,07	0,002	0,60	9,53	0,55	-	-	-	-	-	-

*Среднее значение.

**Стандартная ошибка.

лесах, напротив, в водах ПК кислотность выше ($p < 0,05$), чем в водах в МК. Это объясняется высоким объемом атмосферных выпадений, особенно стволых вод, промывающих почвы под кронами сосны.

В водах из всех горизонтов почв дефолирующих еловых и сосновых лесов концентрации основных поллютантов в ПК и МК значительно выше по сравнению с фоном: для никеля до 50 раз, меди – до 20 раз и серы – до 7 раз.

Внутрибиогеоценотические различия показывают, что концентрации меди, никеля, сульфатов под кронами ели достоверно выше, чем между крон. При этом в сосновых лесах концентрация меди в водах из органо-генных горизонтов почв МК достоверно ($p < 0,05$) выше, чем ПК. Возможно, это связано с большим количеством стволых вод у сосны, промывающих почвы. В отличие от фоновых условий кислотность вод из всех горизонтов почв в дефолирующих еловых и сосновых лесах достоверно ниже ($p < 0,05$) в МК по сравнению с ПК. В условиях воздушного промышленного загрязнения это можно объяснить возрастанием поступления кислотообразующих веществ из атмосферы, особенно под кронами, и нарушением функционирования фитоценоза.

В техногенных еловых и сосновых редколесьях концентрации никеля в почвенных водах до 600 раз, меди – до 100 раз и сульфатов – до 20 раз выше, чем в фоне. Исключение составляет медь в водах из ВС горизонта в МК здесь различия не достоверны ($p > 0,05$).

Концентрации основных поллютантов в почвенных водах в ПК достоверно выше, чем в МК. Кислотность вод из всех горизонтов почв в техногенном еловом и сосновом редколесье в ПК достоверно выше ($p < 0,05$), чем в МК за исключением вод из E + B горизонтов ($p > 0,05$).

Таким образом, состав почвенных вод в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях характеризуется значительным внутрибиогеоценотическим варьированием. Концентрации меди, никеля, сульфатов и кислотность, как правило, выше в ПК по сравнению с МК.

**Пространственная межбиогеоцено-
тическая вариабельность состава почвенных вод.**

В водах подкороновых пространств фоновых еловых лесов из А0 горизонтов почв концентрации никеля и сульфатов, а также сульфатов в водах из Е + В и ВС горизонтов существенно (до 2 раз) выше, чем в сосновых лесах. В водах из А0 горизонтов МК сосновых и еловых лесов концентрации никеля практически сопоставимы. Концентрации сульфатов в МК сосняков в водах из Е + В и ВС горизонтов до 3 раз ниже, чем в еловых лесах, остальные различия недостоверны. Проходящие сквозь полог древесных растений осадки становятся более концентрированными, ель осуществляет более глубокую трансформацию, чем сосна из-за более протяженной и плотной кроны. Кислотность в почвенных водах из всех горизонтов почв в ПК и МК сосновых лесов достоверно ($p < 0,05$) выше, чем в еловых лесах, за исключением вод из ВС горизонтов МК. Это можно объяснить более высоким содержанием кальция в почвах еловых лесов [Лукина, Никонов, 1996].

В дефолирующих лесах в водах из всех горизонтов почв в ПК и МК концентрация основных поллютантов достоверно выше в еловых лесах, исключения составляют концентрации соединений этих элементов в водах из ВС горизонтов в ПК и меди в водах из А0 горизонтов в МК – здесь различия недостоверны. Кислотность в водах из всех горизонтов почв в ПК и МК в еловых лесах достоверно выше, чем в сосновых лесах. В условиях воздушного промышленного загрязнения это можно объяснить возрастанием потока кислотообразующих веществ под кронами ели, которая сорбирует большее количество веществ по сравнению с высокой и ажурной кроной сосны.

В техногенных еловых редколесьях в ПК и МК, концентрации Cu, Ni и SO_3^{2-} в водах из всех горизонтов почв достоверно выше ($p < 0,05$), чем в сосновом редколесье, за исключением концентрации в водах из ВС горизонтов. Так же как в дефолирующих лесах, кислотность в водах из всех горизонтов почв в ПК и МК в еловых лесах достоверно выше, чем в сосновых лесах.

Таким образом, состав почвенных вод на всех стадиях дигрессии характеризуется значительным межбиогеоценоотическим варьированием. Концентрации элементов, как прави-

ло, выше в почвенных водах в ПК еловых лесов по сравнению с сосновыми.

Динамика концентраций и выноса элементов в почвенных водах. В фоновых еловых лесах многолетняя динамика содержания поллютантов демонстрирует значительную вариабельность, достоверных закономерностей не обнаружено.

В дефолирующих еловых лесах многолетняя динамика показала снижение концентраций никеля – от 0,2 до 0,1 мг/л ($R^2 = 0,45$), меди – от 0,2 до 0,1 мг/л ($R^2 = 0,49$) и сульфатов – от 28 до 12 мг/л ($R^2 = 0,38$) в водах из А0 горизонтов в ПК, тогда как в МК снижение наблюдается только для сульфатов – от 10 до 6 мг/л ($R^2 = 0,42$). В сосновых лесах тенденции к снижению с годами можно наблюдать для меди – от 0,02 до 0,01 мг/л ($R^2 = 0,41$) и сульфатов – от 10 до 5 мг/л ($R^2 = 0,52$) в водах из А0 горизонтов ПК, в МК только в концентрациях сульфатов – от 10 до 2 мг/л ($R^2 = 0,49$). Это может объясняться снижением аэротехногенной нагрузки.

Многолетняя динамика выноса соединений никеля, меди и сульфатов в ПК и меди в МК с почвенными водами еловых лесов показала тренд к увеличению с 1993 по 2003 г., а затем к снижению с 2003 по 2012 г. для никеля, меди (рис. 2). Закономерности в многолетней динамике выноса объясняются положительной связью, не только с их концентрациями, но и с объемами атмосферных осадков. Так, в еловых лесах обнаружена положительная связь между объемами атмосферных осадков и выносом соединений тяжелых металлов и серы с почвенными водами как в ПК, так и МК ($r = 0,55$ и $0,54$ соответственно). Многолетняя динамика объема осадков показала тренд к увеличению от 364 до 632 мм с 1993 по 2007 г., а затем снижение (до 455 мм) к 2012 г. Таким образом, на состав и свойства почвенных вод большое влияние оказывают не только уровень загрязнения, но и количество осадков, которое значительно варьирует на Кольском полуострове в последние десятилетия [Семенов и др., 2006]. Комбинированное действие уровня аэротехногенного загрязнения и количества осадков ярко проявляется в дефолирующих еловых лесах.

В техногенном еловом (см. рис. 2) и сосновом редколесье многолетняя динамика кон-

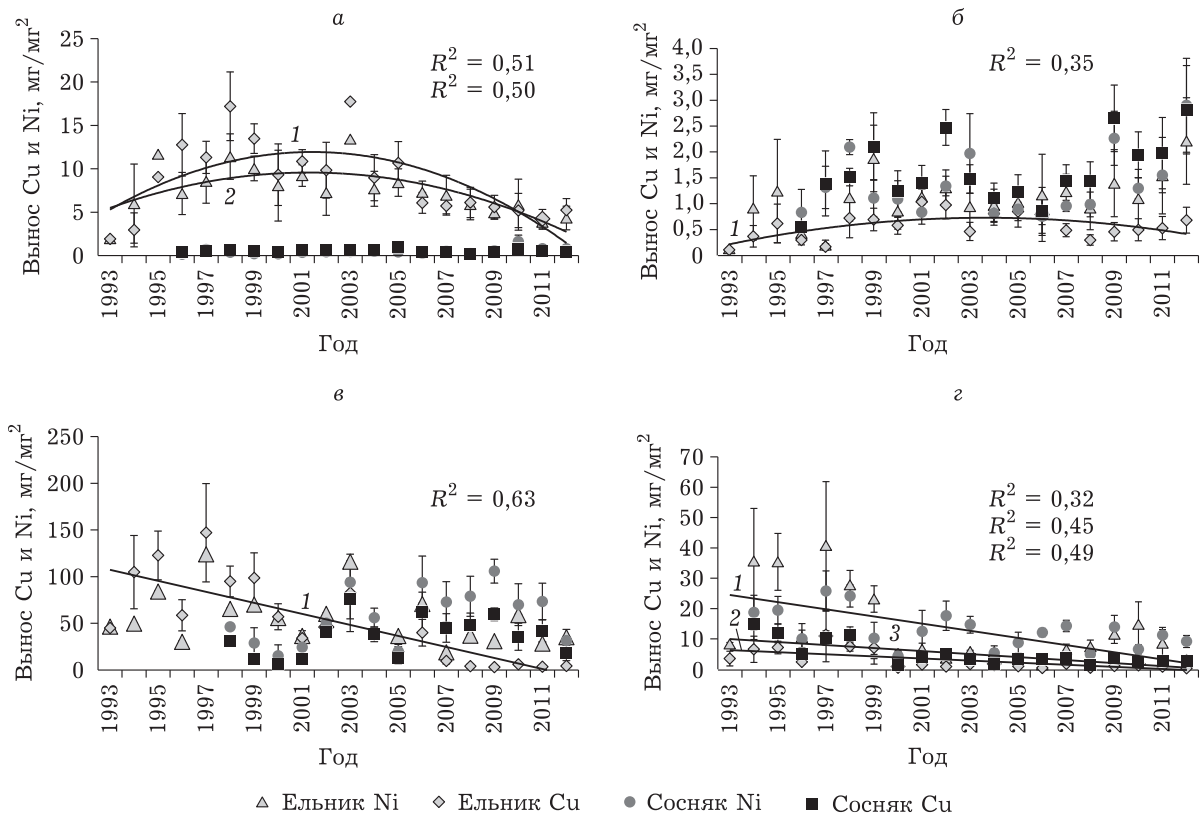


Рис. 2. Вынос меди и никеля с почвенными водами из органических горизонтов в еловых и сосновых лесах. Дефолирующие леса: а – под кронами и б – между крон, редколесье: в – под кронами и г – между крон

центраций и выноса, основных поллютантов демонстрирует снижение, что можно объяснить снижением аэротехногенной нагрузки комбинатом.

ОБСУЖДЕНИЕ

Атмосферные выпадения

На основе полученных результатов исследований установлено, что выпадения соединений тяжелых металлов и серы многократно превышают фоновые уровни даже после существенного снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Целесообразно сравнить уровни выпадений поллютантов из атмосферы на объектах представленных исследований с установленным в международной практике критическим уровнем. Причем, поскольку на основе результатов проведенных исследований установлены существенные меж- и внутрибиогеоценотические различия выпадений и со снегом, и с дождем, сравне-

ния следует проводить с учетом этих различий. Критический уровень общих выпадений (с дождем и снегом) сульфатной серы из атмосферы в Центральной Лапландии составляет $0,3 \text{ г/м}^2$ в год [Korhola et al., 1999]. Уровень критических пределов для атмосферных выпадений никеля и меди – 10 и 5 г/га в год [Reinds et al., 2006].

В фоновых еловых и сосновых лесах превышение уровня критической нагрузки выпадений сульфатной серы можно наблюдать только в еловых лесах в ПК (в 2 раза). В дефолирующих еловых и сосновых лесах превышение данного уровня нагрузки наблюдается также только в ПК, для ельников – в 5 раз, для сосняков – в 3,5 раза, в МК превышений не обнаружено. В техногенных еловых и сосновых редколесьях в ПК выпадения соединений серы превысили критический уровень в 7 и 3,5 раза соответственно, в МК – в 2 и 1,4 раза.

В фоновых еловых и сосновых лесах превышение уровня критических нагрузок по

никелю не наблюдается ни в ПК, ни в МК. Превышение уровня критических пределов по меди в ПК составляет в ельниках – до 5 раз, в сосняках – до 3 раз, в МК – до 1,5 раза в сосновых и еловых лесах. В дефолирующих еловых и сосновых лесах превышение уровня критических нагрузок для никеля в ПК ельников составляет 44 раза, для меди – 87 раз, в ПК сосняка – никеля – 31 раз, для меди – 64 раза. В МК превышения составляют в ельниках для никеля – 3,4 раза, для меди – в 5,7 раза, в сосняках для никеля – 2 раза и меди – в 2,8 раза. В техногенных редколесьях в ПК выпадения никеля и меди с атмосферными осадками превышают уровень критических нагрузок в 370 и 600 раз соответственно в еловых лесах и в 120 и 260 раз – в сосновых лесах. В МК превышения уровня критических нагрузок тяжелых металлов существенно ниже: 49 и 54 раза в еловых лесах и 23 и 20 раз соответственно – в сосновых.

Таким образом, результаты проведенных исследований демонстрируют, что учет не только межбиогeoценотических, но и внутрибиогeoценотических различий в составе атмосферных выпадений соединений элементов позволят провести более раннюю диагностику превышений критических нагрузок на разных стадиях техногенной дигрессии. Данные об атмосферных выпадениях в ПК еловых лесов являются более информативными для выявления превышений уровня критических нагрузок, не только в фоновых условиях, но и на стадиях выраженной техногенной дигрессии.

Оценка критического уровня характеристик почвенных вод на всех стадиях дигрессии для функционирования древесных растений

Проведенные исследования демонстрируют значительные превышения фоновых уровней выноса соединений тяжелых металлов и серы с почвенными водами и существенные пространственные меж- и внутрибиогeoценотические различия. Для оценки превышений критического уровня учтены пространственные различия и использованы такие международные химические индикаторы, как мо-

лярное отношение основных катионов и алюминия и концентрации минерального азота в почвенном растворе: для первого показателя этот уровень для лесов, доминантами которых являются *Pinus sylvestris* и *Picea abies* составляет <1,2, а для второго – >0,2 мг/л [Iost et al., 2012].

Молярные отношения основных катионов и алюминия. В еловых и сосновых лесах в водах из всех горизонтов почв, на всех стадиях дигрессии показатель BC/Al существенно превышает критические значения в ПК и МК.

В фоновых и дефолирующих еловых лесах и фоновых сосняках показатель BC/Al в почвенных водах уменьшается от A_0 к BC горизонту как под кронами, так и между крон деревьев, что связано с активным поглощением основных катионов растениями. В редколесьях сходной отчетливой тенденции не обнаружено из-за глубоких нарушений функционирования биогeoценозов.

Внутрибиогeoценотические различия показателя BC/Al в еловых и сосновых лесах на всех стадиях дигрессии в водах из всех горизонтов в большинстве случаев достоверны ($p < 0,05$). В еловых лесах данный показатель в водах из всех горизонтов почв в фоновых условиях и в водах из A_0 горизонтов в дефолирующих лесах, а также в водах из $E + B$ горизонтов в редколесьях в ПК достоверно выше, чем в МК, что связано с относительно высокой концентрацией кальция в почвах под кронами, тогда как по алюминию наблюдается обратная картина, либо различия не проявляются [Лукина, Никонов, 1996].

В ПК и МК дефолирующих еловых лесов показатель BC/Al в водах из всех горизонтов до 5 раз ниже, чем на фоновой территории, что свидетельствует о процессах истощения почв основными катионами. В дефолирующих сосновых лесах показатель BC/Al в водах из A_0 горизонтов выше до 1,5 раза под кронами и до 5 раз – между крон деревьев в водах из всех горизонтов, чем в фоне, что, возможно, обусловлено глубокой корневой системой сосны, в отличие от ели, способной вовлекать в круговорот элементы питания из глубоких минеральных горизонтов почв, богатых основными катионами в

данных условиях, и с происходящими интенсивными катионообменными процессами в почвах.

В техногенном еловом редколесье показатель BC/Al в водах из $E + B$ горизонтов до 2 раз выше, чем в фоне, как в ПК, так и в МК. В сосновом редколесье этот показатель в водах из A_0 и $E + B$ горизонтов выше до 9 раз, чем на фоновой территории, в ПК и МК. Это связано с богатыми почвообразующими породами с примесью габбро-норитов вблизи комбината.

Таким образом, показатель BC/Al в почвенных водах сосновых и еловых лесов как под кронами, так и между кронами деревьев значительно превышает критические значения. Это можно объяснить относительным богатством почв основаниями на объектах исследований, особенно вблизи комбината.

Азот минеральный. В фоновых ельниках и сосняках показатель N_{min} в почвенных водах уменьшается с глубиной почв как в ПК, так и МК, что может объясняться активным биологическим поглощением. В дефолирующих лесах и в техногенных редколесьях из-за нарушения функционирования фитоценозов данная тенденция наблюдается только в сосновых лесах между крон деревьев.

По минеральному азоту критический уровень в период наблюдений, охватывающий высокий уровень загрязнения воздуха (1995–2000 гг.), превышен даже в фоновых еловых и сосновых лесах в водах из всех горизонтов почв как в ПК, так и в МК. Ранее, на основе данных, полученных в период резкого снижения нагрузок – 2002–2008 гг. [Lukina et al., 2018], а также на основе данных следующих лет 2009–2012 гг., дополнительно проанализированных в настоящем исследовании, превышения критических уровней по минеральному азоту в водах из минеральных горизонтов почв фоновых лесов не выявлялись. Можно заключить, что произошедшее снижение выбросов могло привести к некоторой оптимизации азотного статуса почвенных вод.

В дефолирующих еловых и сосновых лесах превышение критического уровня по N_{min} наблюдается в водах из A_0 и BC горизонтов ельников в ПК и в водах из A_0 горизонтов в ПК и $E + B$ в МК сосняков. В техногенных еловом и сосновом редколесьях критический

уровень N_{min} превышен как в ПК, так и в МК в водах из всех горизонтов, исключение составляют воды их $E + B$ горизонтов в сосновых лесах между крон деревьев.

В фоновых еловых и сосновых лесах внутрибиогеоценотические различия для N_{min} в водах из всех горизонтов недостоверны ($p > 0,05$), за исключением вод из A_0 горизонтов почв еловых лесов, что подтверждает представления об ограничениях вымывания соединений азота (лимитирующего фактора роста и продуктивности бореальных лесов) из крон древесных растений [Piirainen et al., 1998]. В дефолирующих лесах и редколесьях, напротив, наблюдаются более высокие концентрации минерального азота в ПК в почвенных водах, что можно объяснить атмосферным загрязнением и вымыванием соединений азота из крон деревьев с поврежденной хвоей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлена значительная внутри- и межбиогеоценотическая вариабельность состава атмосферных выпадений в еловых и сосновых лесах на разных стадиях техногенной дигрессии. Концентрация элементов в атмосферных осадках, прошедших сквозь лесной полог, выше, чем между крон деревьев. Подтверждено, что ель сильнее трансформирует осадки, чем сосна, что объясняется ее более плотной и протяженной кроной.

Выявленные превышения уровней критических нагрузок атмосферных выпадений сульфатной серы и тяжелых металлов на стадиях техногенной дигрессии свидетельствуют о продолжающемся негативном воздействии воздушного промышленного загрязнения на лесные биогеоценозы при происходящем снижении выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Состав почвенных вод на всех стадиях дигрессии также характеризуется значительным внутри- и межбиогеоценотическим варьированием. Концентрации элементов, как правило, выше в почвенных водах подкрупных пространств по сравнению с межкрупными, и в еловых лесах по сравнению с сосновыми.

Данные по многолетней динамике концентраций тяжелых металлов и сульфатов в почвенных водах отличаются высокой вариабельностью и демонстрируют тенденцию к снижению, что может свидетельствовать о постепенном снижении техногенной нагрузки. Однако анализ полученных данных и сопоставление с фоновыми значениями свидетельствует о существенном влиянии воздушного промышленного загрязнения на леса. На вынос соединений элементов, являющихся компонентами выбросов, с почвенными водами комбинированное влияние оказывают уровень загрязнения и количество осадков, которое ярко проявилось в еловых дефолирующих лесах.

Показатель Bc/Al в почвенных водах основных и еловых лесов как под кронами, так и между крон деревьев на всех стадиях дигрессии значительно превышает критические значения. Это можно объяснить богатством почвообразующих пород и почв региона исследований основными катионами. Относительно низкие значения этого показателя в водах из верхних горизонтов почв дефолирующих еловых лесов по сравнению с фоном, что свидетельствует о процессах истощения почв основными катионами по сравнению с фоном.

Критический уровень для минерального азота превышен на всех стадиях дигрессии, при этом в подкروновых пространствах превышения, как правило, выше, чем в межкروновых.

Для раннего выявления превышений критического уровня концентраций минерального азота в почвенных водах на всех стадиях дигрессии необходима оценка их состава как в межкروновых, так и в подкروновых пространствах.

Исследование проводилось в рамках тем государственного задания ФИЦ КНЦ РАН № 0226-2018-0111) и ЦЭПЛ РАН № 0110-2018-0007, программы Президиума РАН №0110-2018-0005, а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00170 мол_а).

ЛИТЕРАТУРА

Копчик Г. Н. Устойчивость лесных почв к атмосферному загрязнению // Лесоведение. 2004. № 4. С. 61–71.

Копчик Г. Н., Копчик С. В., Смирнова И. Е., Кудрявцева А. Д., Турбабина К. А. Реакция лесных экосистем на сокращение атмосферных промышленных выбросов в Кольской субарктике // Журн. общ. биологии. 2016. Т. 77, № 2. С. 145–163.

Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 216 с.

Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. 316 с.

Лукина Н. В., Полянская Л. М., Орлова М. А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. Выявление климатогенных изменений. М.: Изд. центр “Метеорология и гидрология”, 2006. 325 с.

Цветков В. Ф., Цветков И. В. Промышленное загрязнение окружающей среды и лес. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 312 с.

Derome J., Lukina N. Interaction between environmental pollution and land-cover/land-use change in Arctic areas // Eurasian Arctic land cover and land use in a changing climate / eds. G. Gutman, A. Reissell. Netherlands: Springer, 2010. P. 269–290.

Ershov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Zukert N. V. Dynamics of snowmelt water composition in conifer forests exposed to airborne industrial pollution // Rus. Journ. Ecol. 2016. Vol. 47, N 1. P. 46–52. DOI: 10.1134/S1067413616010045.

Korhola A., Weckstrom J., Nyman M. Predicting the long-term acidification trends in small subarctic lakes using diatoms // J. Appl. Ecol. 1999. Vol. 36. P. 1021–1034.

Kashulina G., Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // Atmospheric Environ. 2014. Vol. 89. P. 672–682.

Iost S., Rautio P., Lindrooset A.-J. Spatio-temporal trends in soil solution Bc/Al and N in relation to critical limits in European forest soils // Water Air Soil Pollut. 2012. Vol. 223. P. 1467–1479.

Lukina N. V., Nikonov V. V. Degradational succession of forest ecosystems in the surroundings of Cu–Ni smelter in the Kola Peninsula // Proc. of 28th Ann. Meeting. May, 2003. Sudbury, Ontario. [CD ROM].

Lukina N. V., Ershov V. V., Gorbacheva T. T., Orlova M. A., Isaeva L. G., Teben'kova D. N. Assessment of soil water composition in the northern taiga coniferous forests of background territories in the industrially developed region // Euras. Soil Sci. 2018. Vol. 51, N 3. P. 285–297.

Mahera W., Krikowa F., Wruck D., Louie H., Nguyen T., Huang W. Y. Determination of total phosphorus and nitrogen in turbid waters by oxidation with alkaline potassium peroxodisulfate and low pressure microwave digestion, autoclave heating or the use of closed vessels in a hot water bath: Comparison with Kjeldahl digestion // Analytica Chim. Acta. 2002. Vol. 463. P. 283–293.

Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part XIV Sampling and Analysis of Deposition. 2010. www.icp-forests.com

- Nieminen T. M., Derome K., Meessenburg H. M., De Vos B. Soil solution: Sampling and chemical analysis // Development in Environ. Sci. Vol. 12. P. 301–315.
- Nilsson J., Grennfelt P. Critical Loads for Sulphur and Nitrogen. Miljörappport. 1988. P. 418.
- Piirainen S., Finér L., Starr M. Canopy and soil retention of nitrogen deposition in a mixed boreal forest in Eastern Finland // Biogeochemical investigations at watershed, landscape, and regional scales. 1998. P. 165–174.
- Reinds G. J., Groenenberg J. E., Vrieset W. Critical loads of copper, nickel, zinc, arsenic, chromium and selenium for terrestrial ecosystems at a European scale. Wageningen: Alterra, 2006. P. 46.
- Reinmann C., Äyräs M., Chekushin V. et al. Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region. NGU-GTK-CKE Special Publication. Oslo, 1997. 745 p.
- Sokal R. R., Rohlf F. J. Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. 4th edition. New York: W. H. Freeman and Co., 2012. 937 p.
- Svedrup H., Warfvinge P. Effect of soil acidification on the growth of trees and plants as expressed by the (Ca + Mg + K)/Al ratio // Reports in Environ. Engineer. and Ecol. 1993. Vol. 2. P. 123.
- Steinnes E., Lukina N., Nikonov V., Aamlid D., Royset O. A Gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula // Environ. Monitoring and Assessment. 2000. Vol. 60. P. 71–81. www.nornik.ru

Assessment of Soil Water Composition Dynamics in the North Taiga Forests at Reduction of Industrial Air Pollution by Emissions of Copper-Nickel Smelters

V. V. ERSHOV¹, N. V. LUKINA², M. A. ORLOVA², L. G. ISAEVA¹,
V. E. SMIRNOV^{2,3}, T. T. GORBACHEVA¹

¹ *Institute of the North Industrial Ecology Problems of the Kola Scientific Center, RAS
184209, Apatity, Akademgorodok, 14a
E-mail: Slavo91@gmail.com*

² *Center for Forest Ecology and Productivity of RAS
117997, Moscow, Profsoyuznaya str., 84/32, build. 14
E-mail: lukina@cepl.rssi.ru*

³ *Institute of Mathematical Problems of Biology, M. V. Keldysh Branch of IAM, RAS
142290, Pushchino, Professor Vitkevich str., 1
E-mail: vesmirnov@gmail.com*

This work is aimed at assessing the dynamics of the composition of soil water in coniferous forests subjected to air pollution from copper-nickel smelters “Severonickel” in the Murmansk region. Objects of investigations were the most common in boreal zone spruce forests with dwarf shrubs + green mosses and pine forests with dwarf shrubs + lichens. The obtained results showed a significant intra- (below the crowns and between the crowns) and inter-biogeocoenotic (spruce and pine forests) variation in the composition of atmospheric deposition and soil waters in forests under pollution. Atmospheric deposition of pollutants and leaching their compounds from all soil genetic horizons were tens (sulfates) and hundreds (copper, nickel) times higher than in reference sites, and their fluxes below the crowns were usually more intense than between the crowns. Long-term dynamics (from 1993 to 2012) demonstrated reliable trends in reducing concentrations and leaching sulfates and heavy metals from the soil. The molar ratio of basic cations to aluminum (BC/Al) in soil waters from all soil horizons did not drop to the critical level, whereas for mineral nitrogen the lowest critical level (0.2 mg/l) was exceeded in waters from all horizons at all stages of digression. It has been shown that for early detection of exceedances of critical level for mineral nitrogen in soil waters an evaluation of their composition is necessary not only between the crowns but also below them.

Key words: coniferous forests, industrial air pollution, pollution-induced digression, atmospheric deposition, soil waters, heavy metals, sulfates, spatial variation, many-year dynamics.