

## ОЦЕНКА СОСТАВА ДОЖДЕВЫХ ВЫПАДЕНИЙ В ХВОЙНЫХ ЛЕСАХ НА СЕВЕРНОМ ПРЕДЕЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ АЭРОТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

© 2020 г. В. В. Ершов<sup>а, \*</sup>, Н. В. Лукина<sup>б</sup>, М. А. Данилова<sup>б</sup>, Л. Г. Исаева<sup>а</sup>,  
Т. А. Сухарева<sup>а</sup>, В. Э. Смирнов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,  
Россия 184209 Апатиты, Академический городок, 14а

<sup>б</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,  
Россия 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

\*e-mail: Slavo91@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2019 г.

После доработки 06.11.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Данная работа посвящена оценке межбиогeoценотического и внутрибиогeoценотического варьирования, а также многолетней динамики состава атмосферных выпадений в форме дождя в хвойных лесах, подверженных воздействию крупнейшего в Северной Европе источника выбросов загрязняющих веществ в атмосферу – медно-никелевого комбината “Североникель” (Мурманская область). Исследовали распространенные в бореальной зоне ельники кустарничково-зеленомошные и сосняки кустарничково-лишайниковые на разных стадиях техногенной дигрессии. Химический состав дождевых вод характеризуется значительным внутри- и межбиогeoценотическим варьированием. На основе многолетних данных подтверждается, что содержание элементов в подкroновых пространствах существенно выше, чем в межкroновых, при этом в ельниках по сравнению с сосняками концентрации и выпадения элементов значимо выше. Это объясняется разной сорбирующей способностью крон деревьев и выщелачиванием из них элементов. Выпадения основных поллютантов с дождевыми водами превышали критические уровни уже в фоновых условиях, и в значительно большей степени в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях. Показано, что превышения критических уровней в дождевых водах выражено значительно ярче, чем в снеговых. Учет внутрибиогeoценотических и межбиогeoценотических различий в составе атмосферных выпадений позволяет провести более раннюю и точную диагностику превышения критических нагрузок на всех стадиях дигрессии. Многолетняя динамика выпадений элементов в дождевых водах сосновых и еловых лесов отличается высокой вариабельностью как под кронами, так и между кронами деревьев. В фоновых условиях выявлено повышение концентраций никеля в период 2013–2017 гг., что объясняется возрастанием содержания поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния.

*Ключевые слова:* атмосферные выпадения, дождь, атмосферное загрязнение, многолетняя динамика, внутри- и межбиогeoценотическое варьирование, критические уровни

DOI: 10.31857/S0367059720040058

Атмосферные выпадения в виде дождя играют важную роль в циклах элементов и функционировании лесных экосистем. Химический состав дождевых вод значительно изменяется после контакта с пологом леса, при этом взаимодействии происходят физико-химические реакции, приводящие к изменению кислотности вод и концентраций элементов, содержащихся в них [1–5]. Во многих работах отмечается влияние видового состава древесных растений на химический состав и количество атмосферных выпадений [6–8 и др.]. Показано, что в межкroновых пространствах лесов на северном пределе распространения атмосфер-

ные выпадения имеют преимущественно атропогенный характер (состав выпадений определяют атмосферные осадки), а в подкroновых пространствах – преимущественно аутогенный (биогенный) [9].

В современный период на формирование состава атмосферных осадков большое влияние оказывает воздушное промышленное загрязнение [1, 10–13 и др.]. Кольский полуостров – наиболее индустриально развитый северный регион, на территории которого функционирует крупнейший в Северной Европе источник воздушного промышленного загрязнения – медно-никелевый комбинат “Североникель” (АО “Кольская ГМК”). В условиях

воздушного промышленного загрязнения бореальные леса выступают как трансформатор техногенных потоков [14]. Основными поллютантами, оказывающими негативное воздействие на лесные биогеоценозы, являются кислотообразующие соединения серы и тяжелые металлы (никель, медь, кобальт, свинец, кадмий, хром и др.). Общая характеристика состава атмосферных выпадений в северотаежных лесах Кольского полуострова, подверженных воздушному загрязнению и находящихся на различном удалении от источника загрязнения, описана во многих научных работах [12, 13, 15–17 и др.]. Однако для прогнозирования динамики биогеохимических циклов элементов и функционирования лесов необходимы оценки с учетом многолетних измерений состава и свойств атмосферных выпадений, сравнение уровня выпадений загрязняющих веществ с известным критическим уровнем в лесах и выявление наиболее информативных формаций хвойных лесов и отдельных элементов их мозаик для ранней диагностики загрязнения.

Цели настоящей работы – оценить состав дождевых выпадений в наиболее распространенных в бореальной зоне хвойных лесах на разных стадиях техногенной дигрессии, обусловленной влиянием крупнейшего в Северной Европе источника выбросов загрязняющих веществ в атмосферу – медно-никелевого комбината “Североникель”, с учетом внутри- и межбиогеоценотического варьирования на основе многолетних наблюдений, а также многолетнюю динамику состава дождевых выпадений.

В работе решали следующие научные вопросы:

1. В чем отличия состава дождевых выпадений в основных элементах мозаики хвойных лесов северо-запада России?
2. Какие элементы мозаики хвойных лесов позволяют проводить наиболее раннюю диагностику критических нагрузок?
3. Каковы закономерности многолетней динамики состава дождевых выпадений в хвойных лесах, формирующихся в фоновых условиях и на разных стадиях техногенной дигрессии?

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали доминирующие в бореальной зоне ельники кустарничково-зеленомошные и сосняки лишайниково-кустарничковые в условиях различного уровня техногенного загрязнения. Объекты исследований, располагающиеся на расстоянии 100 км и более от источника выбросов, характеризуют леса на фоновых территориях, на расстоянии 28, 31 км – дефолирующие леса, 7–10 км – техногенные редколесья [15, 18]. На всех мониторинговых площадках под кронами деревьев и в межкрупных пространствах уста-

новлены осадкоприемники не менее чем в трехкратной повторности.

Осадкоприемники для дождевых вод представляют собой пластиковые трубы диаметром 14.5 см. Внутри трубы помещается полиэтиленовый пакет вместимостью до 3 л, закрепляемый специальным колпаком. Для предотвращения попадания частиц различного происхождения поверхность трубы перед закреплением колпаком покрывается съемной мелкоячеистой сеткой из синтетического материала. Образцы дождевых выпадений в период с мая по октябрь отбирали ежемесячно с 1999 г. по 2017 г. С использованием пластиковой мерной посуды измеряли объем дождевых вод, накопившихся в каждом осадкоприемнике за месячный период в подкрупных и межкрупных пространствах, в трехкратной повторности. Для анализа отбирали аликвотную часть пробы (не менее 250–300 мл).

В день отбора пробы транспортировали в лабораторию, где проводили смешивание трех проб с учетом элемента мозаики (межкрупные и подкрупные пространства). Смешивание проводили в соотношениях объемов, замеренных в полевых условиях. Каждую пробу аналитической партии фильтровали через бумажный фильтр “синяя лента” (диаметр пор 1–2.5 мкм). В лаборатории в каждой объединенной пробе измеряли pH, затем пробы замораживали и хранили в морозильной камере при  $-180^{\circ}\text{C}$  до начала анализов. Кислотность (pH) вод определяли потенциметрически, катионы (Ca, Mg, K, Na, Cu, Ni) – методами атомно-абсорбционной спектrophотометрии, анионы минеральных кислот (сульфаты, нитраты, хлориды) – методом ионообменной хроматографии, аммоний – колориметрически, углерод – хроматометрией либо перманганатометрией в зависимости от концентрации. Кислотонейтрализующую способность рассчитывали как разность суммы основных катионов и анионов минеральных кислот (ммоль/л).

Для характеристики состава атмосферных выпадений в виде дождя использовали данные за период с 1999 г. по 2017 г. Согласно отчетности по площадке Мончегорск за 2012 г., компания “Норникель” в течение 8 лет соблюдает норматив предельно допустимых выбросов, что способствовало снижению выбросов основных поллютантов по площадке за период 1990–2011 гг.:  $\text{SO}_2$  (тыс. т) – в 7.4 раза; Cu и Ni (т/год) – до 7.8 раз (данные АО “Кольская ГМК”).

Для меж- и внутрибиогеоценотического сравнения концентраций и выпадений элементов с дождем использовали  $v$ -критерий, расчет которого выполняли в среде статистического программирования R [19, 20]. При оценке связей в составе выпадений оценивали коэффициент корреляции Спирмена.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Внутрибиогеоэкологическое варьирование концентраций элементов в выпадениях*

На *фоновой территории* в составе выпадений в виде дождя в еловых лесах доминировал углерод (табл. 1). Из катионов в водах преобладали калий и аммоний, среди анионов — сульфаты и хлориды. Подтверждается, что концентрация всех элементов в подкروновых (ПК) водах значимо выше ( $p < 0.05$ ), чем в межкروновых (МК) [15, 18], что свидетельствует о смыве и выщелачивании соединений элементов из растительных тканей. В водах ПК пространств наблюдаются тесные положительные связи между концентрациями основных катионов (Ca, K, Mg, Na), Ni, с одной стороны, и сульфатов и хлоридов, с другой (коэффициент корреляции  $r$  варьирует от 0.71 до 0.90,  $p < 0.05$ ,  $n = 64$ ). Концентрации углерода положительно связаны с концентрациями Ca, Mg и K ( $r = 0.53–0.59$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 64$ ). В водах МК пространств положительные связи обнаруживаются между концентрациями Mg и K и концентрациями углерода ( $r = 0.58–0.71$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 62$ ). Концентрации хлоридов положительно связаны с концентрациями натрия ( $r = 0.62$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 62$ ). Выявленные связи свидетельствуют о сопряженной миграции катионов и анионов.

В дождевых водах *дефолирующих* еловых лесов по сравнению с фоном наблюдается существенное увеличение концентраций поллютантов: Cu — до 20 раз, Ni — до 28 раз как в ПК, так и в МК пространствах, и сульфатов до 3 раз в ПК, что связано с высокими уровнями воздушного промышленного загрязнения. При этом концентрация углерода существенно снижается по сравнению с фоном, что обусловлено дефолиацией крон. Также наблюдается увеличение кислотности дождевых вод в ПК пространствах. Концентрации Ca, Mg и Na значимо выше в ПК пространстве по сравнению с фоном, тогда как в МК пространстве значимые различия по сравнению с фоном не наблюдаются. Увеличение концентраций Ca, Mg и Na объясняется выщелачиванием этих элементов из крон деревьев в результате действия кислых осадков.

В условиях аэротехногенного загрязнения тканей древесных растений обедняются малоподвижными Ca и Na, которые накапливаются в стареющей, часто поврежденной хвое [18], а также Mg — элементом средней подвижности. Концентрации всех элементов в водах ПК пространств значимо выше (при  $p < 0.05$ ), чем в МК, как и в фоновых условиях, кислотность вод под кронами деревьев также значимо выше. Как и следовало ожидать, показатель pH тесно и отрицательно связан с концентрациями сульфатов и органического углерода ( $r = -0.62$  и  $r = -0.51$  соответственно,  $p < 0.05$ ,  $n = 70$ ) в водах ПК пространств. Обнаруживаются значи-

мые положительные связи ( $r = 0.59–0.96$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 70$ ) между концентрациями основных катионов (Ca, Mg, K, Na), Ni, Cu, с одной стороны, и концентрациями сульфатов и хлоридов, с другой, в водах под кронами деревьев. Между кронами данные связи выявляются для концентраций сульфатов ( $r = 0.46–0.86$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 70$ ), а для хлоридов положительные связи обнаружены с концентрациями Ca, Mg и K ( $r = 0.48–0.87$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 70$ ). Все эти тесные связи свидетельствуют о миграции основных катионов с анионами минеральных и органических кислот, что особенно ярко выражено в ПК пространствах.

Атмосферные выпадения в виде дождя в *техногенных* еловых *редколесьях* отличаются от фоновых резким увеличением концентраций загрязняющих веществ (см. табл. 1), входящих в состав выбросов: Cu — до 108 раз, Ni — до 140 раз как между кронами, так и под кронами деревьев, и сульфатов до 7 раз в МК пространствах. При этом продолжает снижаться концентрация углерода из-за изреживания крон. Концентрации K в водах ПК и МК пространств значимо ниже, чем на фоновой территории. Это объясняется тем, что K относится к элементам, способным к ретранслокации внутри дерева, и накапливается в более молодых неповрежденных или менее поврежденных тканях, поэтому интенсивность его вымывания ниже [18]. В МК пространствах концентрации Ca и Mg в дождевых водах выше, что может быть связано с их высоким содержанием в промышленных выбросах и пылением с поверхностей, не покрытых растительностью (техногенные пустоши).

Как и в фоновых условиях и дефолирующих лесах, в дождевых водах ПК пространств редколесий концентрации всех элементов, как и кислотность, значимо ( $p < 0.05$ ) выше, чем в водах МК пространств. В водах ПК и МК пространств обнаруживаются тесные положительные связи между концентрациями сульфатов, с одной стороны, и концентрациями основных катионов и тяжелых металлов, с другой ( $r$  варьирует от 0.4 до 0.95,  $p < 0.05$ ,  $n = 69–70$ ). Показатель актуальной кислотности значимо и отрицательно связан ( $r$  варьирует от  $-0.52$  до  $-0.71$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 69$ ) с концентрациями сульфатов в водах ПК пространств, тогда как в дождевых водах МК пространств значимых связей не обнаружено.

По сравнению с фоном показатель кислотонейтрализующей способности (ANC), как и концентрация углерода, существенно ниже в водах ПК пространств дефолирующих лесов, а также в ПК и МК пространствах в техногенном редколесье, что объясняется снижением содержания органических кислот из-за изреживания крон и существенным возрастанием концентраций анионов минеральных кислот, особенно сульфатов, в связи с повышением уровня воздушного промыш-

**Таблица 1.** Концентрация соединений элементов в дождевых выпадениях в еловых лесах за период 1999–2017 гг., мг/л

Параметры	v-Критерий			Среднее значение по формации			Общее среднее значение	Общее стандартное отклонение	p		
	Ф	Д	Т	Ф	Д	Т			Ф	Д	Т
<b>Межкروновые пространства (n = 69–76)</b>											
ANC, ммоль/л	5.34	1.29	-6.59	0.04	0.02	-0.04	0.01	0.07	0.00	0.20	0.00
pH	8.23	-0.24	-7.96	5.26	4.65	4.10	4.67	0.76	0.00	0.81	0.00
Ca	-4.75	-1.33	5.98	0.43	0.72	1.29	0.82	0.83	0.00	0.18	0.00
Mg	-3.87	-1.18	4.98	0.10	0.15	0.25	0.17	0.18	0.00	0.24	0.00
K	3.45	-0.68	-2.80	0.62	0.35	0.21	0.40	0.67	0.00	0.50	0.01
Na	-2.24	1.03	1.20	0.45	0.60	0.60	0.55	0.47	0.03	0.30	0.23
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.15	-0.12	-0.03	0.42	0.40	0.41	0.41	0.64	0.88	0.90	0.98
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-6.80	-1.59	8.35	0.99	2.91	6.46	3.47	3.83	0.00	0.11	0.00
Cl <sup>-</sup>	-1.32	0.15	1.16	0.33	0.41	0.46	0.40	0.54	0.19	0.88	0.25
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-2.73	-0.50	3.21	0.58	0.78	1.09	0.82	0.91	0.01	0.62	0.00
Cu	-3.82	-3.55	7.27	0.00	0.01	0.08	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00
Ni	-4.68	-4.07	8.67	0.00	0.01	0.10	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00
C	2.12	-1.13	-0.98	6.00	4.44	4.51	4.98	5.03	0.03	0.26	0.33
<b>Подкروновые пространства (n = 69–76)</b>											
ANC, ммоль/л	11.05	-2.29	-8.70	0.71	0.19	-0.05	0.28	0.41	0.00	0.02	0.00
pH	8.84	-3.48	-5.30	4.14	3.61	3.54	3.76	0.45	0.00	0.00	0.00
Ca	-2.62	4.20	-1.56	3.78	6.05	4.15	4.65	3.46	0.01	0.00	0.12
Mg	-0.54	2.01	-1.46	1.23	1.49	1.14	1.28	1.04	0.59	0.04	0.14
K	8.81	-0.51	-8.25	10.88	6.26	2.51	6.51	5.22	0.00	0.61	0.00
Na	-2.35	1.57	0.78	2.75	3.79	3.57	3.37	2.74	0.02	0.12	0.43
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	6.46	-0.37	-6.09	7.33	4.82	2.71	4.96	3.86	0.00	0.71	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-6.00	4.12	1.87	11.01	30.74	26.27	22.71	20.49	0.00	0.00	0.06
Cl <sup>-</sup>	0.83	-0.59	-0.24	0.97	0.80	0.84	0.87	1.25	0.40	0.55	0.81
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-1.76	0.68	1.09	4.52	5.54	5.71	5.25	4.37	0.08	0.50	0.27
Cu	-5.62	-2.79	8.29	0.01	0.24	1.08	0.46	0.81	0.00	0.01	0.00
Ni	-6.14	-3.26	9.22	0.01	0.28	1.38	0.58	0.94	0.00	0.00	0.00
C	8.67	-0.97	-7.67	84.36	50.14	26.56	53.53	37.06	0.00	0.33	0.00

Примечание: Ф – фоновая территория, Д – дефолирующие леса, Т – техногенное редколесье.

ленного загрязнения. Значимые внутрибиогеоценотические различия обнаруживаются на фоновой территории и в дефолирующих лесах: ANC дождевых вод ПК пространств до 20 раз выше ( $p < 0.05$ ), чем МК, что обусловлено высокой концентрацией органических кислот в кроне вод.

Концентрации нитратов в еловых и сосновых лесах на всех стадиях дигрессии не имеет выраженных внутрибиогеоценотических различий, что можно объяснить выраженным дефицитом азота у хвойных древесных в бореальных лесах [15, 21, 22].

*Межбиогеоценотическое варьирование концентраций элементов в атмосферных выпадениях в виде дождя*

В дождевых водах сосновых лесов наблюдаются сходные внутрибиогеоценотические различия и закономерности изменений, вызванные техногенным загрязнением (табл. 2), но при этом отмечаются существенные различия в характеристиках состава вод, формирующихся в сосновых и еловых лесах.

На *фоновой территории* концентрации всех элементов в осадках в виде дождя в еловых лесах,

как правило, значимо ( $p < 0.05$ ) выше, чем в сосновых лесах, как под кронами, так и между крон деревьев. В ПК пространстве кислотность вод выше в еловых лесах, а в МК — в сосновых. Показатель ANC выше в еловых лесах, чем в сосновых, как под кронами, так и между крон деревьев, что объясняется более высокими концентрациями органического углерода.

В *дефолирующих* еловых лесах концентрации элементов в дождевых водах значимо ( $p < 0.05$ ) выше, чем в сосновых лесах, в ПК и МК пространствах, за исключением концентраций аммония и нитратов, а также углерода в ПК пространстве ( $p < 0.05$ ). Показатель ANC ( $p < 0.05$ ) ниже в дождевых водах ПК пространств еловых лесов по сравнению с сосновыми из-за высокой концентрации сульфатов. При аэротехногенном загрязнении это можно объяснить возрастанием потока кислотообразующих веществ под кронами ели, которая сорбирует большее количество веществ по сравнению с высокой и ажурной кроной сосны.

В *техногенном* еловом *редколесье* в дождевых водах ПК пространств концентрации элементов значимо ( $p < 0.05$ ) выше, чем в сосновом редколесье, за исключением аммония и углерода, для нитратов различия не значимы. В МК пространствах содержание всех элементов в еловом редколесье также значимо выше, чем в сосновых лесах. Кислотность в выпадениях сосновых редколесий значимо ниже, а показатель ANC выше по сравнению с еловыми редколесьями, что объясняется при сопоставимых концентрациях органического углерода высокими концентрациями сульфатов в выпадениях еловых лесов.

Таким образом, техногенное загрязнение оказывает существенное воздействие на состав дождевых вод: в условиях загрязнения возрастают концентрации загрязняющих веществ, кальция и магния. Состав атмосферных выпадений в виде дождя характеризуется значительным внутри- и межбиогенотическим варьированием. Концентрации всех соединений элементов и ANC на всех стадиях дигрессии выше в подкروновых пространствах. При этом концентрации соединений элементов как в ПК, так МК на всех стадиях выше в дождевых водах еловых лесов. Кислотонейтрализующая способность в дождевых водах в фоновых условиях выше в еловых лесах, а в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях, напротив, ANC оказалась выше в сосновых лесах из-за более интенсивного потока кислотообразующих веществ в ельниках.

#### *Выпадения соединений элементов с дождевыми водами*

В сосновых и еловых лесах на всех стадиях дигрессии выпадения соединений элементов отли-

чаются четкими внутрибиогенотическими различиями: выпадения элементов с дождем в ПК пространствах существенно выше, чем в МК (табл. 3). При этом в МК пространствах количество атмосферных осадков в еловых и сосновых лесах на фоновой территории, а также в дефолирующих еловых лесах до 2 раз выше, чем под кронами деревьев. В дефолирующих сосновых лесах и на стадии елового и соснового техногенного редколесья различия в количестве осадков нивелируются, что связано с изреживанием крон деревьев из-за влияния загрязнения. Количество атмосферных осадков на фоновой территории и в дефолирующих еловых лесах ниже по сравнению с сосняками как в ПК, так и в МК пространствах, а на стадии техногенного редколесья различия отсутствуют.

По сравнению с фоном в дефолирующих лесах и на стадии техногенных редколесий выпадения сульфатов, меди и никеля значительно выше как в ПК, так и в МК пространствах. Исключение составляют выпадения сульфатов в еловых лесах в ПК пространствах и в МК пространствах сосновых лесов, где различия оказались незначимыми. Это можно объяснить как возрастанием концентраций элементов, так и отчасти увеличением объема выпадений, обусловленного изреживанием крон и повышением их пропускающей способности.

Хотя объем осадков, проникающих сквозь древесный полог, выше в сосновых лесах, выпадения элементов с дождевыми осадками в еловых лесах выше как под кронами, так и между крон деревьев, что можно объяснить более высокими концентрациями этих элементов в дождевых водах ельников.

#### *Сравнение с критическим уровнем выпадений загрязняющих веществ*

Большой интерес представляет сравнение выпадений загрязняющих веществ на наших объектах исследований с критическим уровнем выпадений в аналогичных условиях. Критический уровень общих атмосферных выпадений (дождь + снег) из атмосферы сульфатной серы ( $S-SO_4^{2-}$ ) в Центральной Лапландии составляет  $0.3 \text{ г/м}^2$  в год [23]; уровень критических пределов для атмосферных выпадений Ni и Cu — 10 и 5 г/га в год [24].

Согласно ранее опубликованным нами данным [23], в снеговых выпадениях в еловых и сосновых лесах, формирующихся в *фоновых условиях*, как под кронами, так и между крон деревьев не отмечается превышения критических нагрузок основных поллютантов. В выпадениях в виде дождя в ПК пространствах еловых лесов в фоновых условиях превышения критических нагрузок наблюдаются только для никеля — до 4 раз и сульфатной серы — до 2 раз. В сосновых лесах в ПК

**Таблица 2.** Межбиогенотическое и внутрибиогенотическое варьирование концентраций элементов в дождевых выпадениях хвойных лесов за период 1999–2017 гг., мг/л

Параметры	v-Критерий				Среднее значение по формации				Общее среднее значение		Общее стандартное отклонение		p	
	ель		сосна		ель		сосна		МК	ПК	МК	ПК	МК	ПК
	МК	ПК	МК	ПК	МК	ПК	МК	ПК						
Фоновые леса (n = 65–75)														
pH	1.15	-2.64	-1.15	2.64	5.26	4.14	5.13	4.36	5.20	4.24	0.68	0.49	0.25	0.01
ANC, ммоль/л	2.54	5.82	-2.54	-5.82	0.04	0.71	0.02	0.41	0.03	0.57	0.06	0.31	0.01	0.00
Ca	1.57	4.36	-1.57	-4.36	0.43	3.78	0.34	2.42	0.39	3.14	0.32	1.83	0.12	0.00
Mg	1.34	4.59	-1.34	-4.59	0.10	1.23	0.08	0.68	0.09	0.97	0.09	0.70	0.18	0.00
K	3.19	8.48	-3.19	-8.48	0.62	10.88	0.19	2.76	0.42	7.05	0.79	5.66	0.00	0.00
Na	0.17	4.20	-0.17	-4.20	0.45	2.75	0.44	1.67	0.44	2.24	0.38	1.52	0.86	0.00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.36	5.17	-1.36	-5.17	0.42	7.33	0.28	3.96	0.35	5.73	0.62	3.84	0.17	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-1.10	6.37	1.10	-6.37	0.99	11.01	1.21	3.14	1.10	7.30	1.18	7.30	0.27	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.73	6.05	-0.73	-6.05	0.33	0.97	0.27	0.20	0.30	0.61	0.54	0.76	0.47	0.00
Cl <sup>-</sup>	1.07	4.56	-1.07	-4.56	0.58	4.52	0.50	2.30	0.54	3.47	0.46	2.88	0.29	0.00
Cu	-1.55	3.80	1.55	-3.80	0.003	0.015	0.005	0.008	0.004	0.01	0.01	0.01	0.12	0.00
Ni	-0.96	1.54	0.96	-1.54	0.002	0.006	0.003	0.004	0.002	0.01	0.004	0.01	0.34	0.12
C	1.42	6.97	-1.42	-6.97	6.00	84.36	4.58	44.27	5.33	65.33	5.86	33.85	0.15	0.00
Дефолирующие леса (n = 71–77)														
pH	1.15	-1.15	-0.02	0.02	4.65	3.61	4.55	3.61	4.60	3.61	0.57	0.27	0.25	0.98
ANC, ммоль/л	0.42	-0.42	-3.89	3.89	0.02	0.19	0.01	0.34	0.01	0.27	0.04	0.24	0.68	0.00
Ca	1.45	-1.45	3.36	-3.36	0.72	6.05	0.57	3.92	0.64	4.96	0.64	3.87	0.15	0.00
Mg	1.42	-1.42	2.68	-2.68	0.15	1.49	0.12	1.02	0.13	1.25	0.13	1.07	0.16	0.01
K	2.09	-2.09	6.84	-6.84	0.35	6.26	0.24	2.37	0.30	4.27	0.33	3.47	0.04	0.00
Na	1.69	-1.69	2.75	-2.75	0.60	3.79	0.46	2.53	0.53	3.13	0.48	2.77	0.09	0.01
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.94	0.94	-1.87	1.87	0.40	4.82	0.49	6.05	0.45	5.46	0.57	4.01	0.35	0.06
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.56	-0.56	4.35	-4.35	2.91	30.74	2.68	16.03	2.79	23.24	2.45	20.77	0.57	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.70	-0.70	3.86	-3.86	0.41	0.80	0.36	0.27	0.39	0.53	0.41	0.84	0.49	0.00
Cl <sup>-</sup>	1.36	-1.36	2.44	-2.44	0.78	5.54	0.61	3.79	0.69	4.63	0.77	4.36	0.17	0.01
Cu	0.50	-0.50	3.36	-3.36	0.01	0.24	0.01	0.11	0.01	0.18	0.01	0.23	0.62	0.00
Ni	0.56	-0.56	3.90	-3.90	0.01	0.28	0.01	0.14	0.01	0.21	0.01	0.22	0.58	0.00
C	-0.15	0.15	-1.11	1.11	4.44	50.14	4.50	55.76	4.47	52.99	2.29	31.30	0.88	0.27
Техногенное редколесье (n = 70–76)														
pH	-2.60	-2.07	2.60	2.07	4.10	3.54	4.28	3.65	4.19	3.59	0.43	0.32	0.01	0.04
ANC, ммоль/л	-2.86	-3.68	2.86	3.68	-0.04	-0.05	-0.01	0.07	-0.02	0.01	0.06	0.20	0.00	0.00
Ca	3.02	2.96	-3.02	-2.96	1.29	4.15	0.87	3.10	1.08	3.62	0.84	2.18	0.00	0.00
Mg	3.35	3.30	-3.35	-3.30	0.25	1.14	0.16	0.75	0.20	0.95	0.18	0.73	0.00	0.00
K	0.47	4.65	-0.47	-4.65	0.21	2.51	0.20	1.28	0.20	1.90	0.18	1.62	0.64	0.00
Na	1.33	1.89	-1.33	-1.89	0.60	3.57	0.52	2.75	0.56	3.15	0.40	2.66	0.18	0.06
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.38	-0.74	-0.38	0.74	0.41	2.71	0.38	3.01	0.39	2.87	0.50	2.46	0.71	0.46
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.68	3.65	-3.68	-3.65	6.46	26.27	4.11	16.94	5.29	21.61	3.93	15.74	0.00	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.98	1.76	-0.98	-1.76	0.46	0.84	0.40	0.44	0.43	0.64	0.42	1.39	0.33	0.08
Cl <sup>-</sup>	2.72	2.72	-2.72	-2.72	1.09	5.71	0.70	3.89	0.90	4.79	0.88	4.06	0.01	0.01
Cu	2.18	3.34	-2.18	-3.34	0.08	1.08	0.04	0.56	0.06	0.82	0.10	0.94	0.03	0.00
Ni	3.80	4.85	-3.80	-4.85	0.10	1.38	0.04	0.58	0.07	0.99	0.09	1.00	0.00	0.00
C	1.61	-0.68	-1.61	0.68	4.51	26.56	3.86	28.34	4.18	27.45	2.43	15.84	0.11	0.49

Примечание: ПК – под кронами, МК – между крон.

**Таблица 3.** Межбиогеоценоотические и внутрибиогеоценоотические среднемесячные выпадения элементов с дождем в хвойных лесах на разных стадиях дигрессии (1999–2017 гг.), мг/м<sup>2</sup>

Параметры	v-Критерий				Среднее значение по формации				Общее среднее значение		Общее стандартное отклонение		p	
	ель		сосна		ель		сосна		МК	ПК	МК	ПК	МК	ПК
	МК	ПК	МК	ПК	МК	ПК	МК	ПК						
Фоновые леса (n = 42–75)														
Объем, мм	-1.52	-2.14	1.52	2.14	33.89	18.99	39.24	25.89	36.39	22.24	20.89	19.03	0.13	0.03
Ca	1.40	3.55	-1.40	-3.55	26.87	164.29	21.65	114.45	24.32	140.62	21.71	82.60	0.16	0.00
Mg	1.07	4.30	-1.07	-4.30	5.97	52.16	4.91	31.85	5.46	42.52	5.76	27.81	0.28	0.00
K	2.59	8.51	-2.59	-8.51	39.33	472.85	12.38	130.17	26.54	311.30	61.16	237.85	0.01	0.00
Na	0.18	3.78	-0.18	-3.78	28.23	118.64	27.52	77.20	27.89	98.96	23.47	64.64	0.86	0.00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.33	4.15	-1.33	-4.15	24.35	338.70	17.65	192.03	21.20	269.06	29.41	208.07	0.19	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-1.02	6.37	1.02	-6.37	63.49	465.35	74.96	153.46	68.90	318.32	66.12	289.35	0.31	0.00
Cl <sup>-</sup>	1.30	4.38	-1.30	-4.38	36.08	188.00	30.20	104.20	33.33	148.50	26.62	112.89	0.19	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.80	6.81	-0.80	-6.81	19.25	41.02	16.51	8.32	17.94	25.73	20.17	28.25	0.43	0.00
Cu	-1.43	1.74	1.43	-1.74	0.22	0.62	0.34	0.47	0.28	0.55	0.50	0.51	0.15	0.08
Ni	-0.90	0.08	0.90	-0.08	0.12	0.25	0.16	0.25	0.14	0.25	0.26	0.37	0.37	0.94
C	1.14	5.62	-1.14	-5.62	401.66	3857.91	302.32	2175.04	354.49	3058.85	513.18	1762.92	0.25	0.00
Дефолирующие леса (n = 50–77)														
Объем, мм	-0.54	-3.61	0.54	3.61	31.87	17.83	33.75	34.15	32.81	26.15	21.59	27.81	0.59	0.00
Ca	1.62	0.98	-1.62	-0.98	36.26	232.46	29.99	209.52	33.11	220.68	23.86	143.52	0.10	0.33
Mg	1.66	0.49	-1.66	-0.49	7.39	55.67	6.14	52.86	6.76	54.23	4.66	35.12	0.10	0.62
K	2.93	6.38	-2.93	-6.38	19.05	245.24	11.82	125.96	15.38	184.40	15.21	114.05	0.00	0.00
Na	1.97	0.68	-1.97	-0.68	30.80	141.04	24.43	129.18	27.57	134.87	19.96	105.43	0.05	0.49
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-1.01	-3.92	1.01	3.92	22.34	198.41	28.31	331.41	25.46	267.14	35.76	207.02	0.31	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.46	3.31	-0.46	-3.31	143.07	1182.08	136.48	822.82	139.75	997.66	87.25	663.86	0.64	0.00
Cl <sup>-</sup>	1.93	0.86	-1.93	-0.86	38.57	205.64	31.49	185.01	34.98	194.91	22.61	145.54	0.05	0.39
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.85	4.03	-0.85	-4.03	21.45	27.53	18.90	12.27	20.18	19.69	18.55	22.86	0.40	0.00
Cu	-0.28	2.34	0.28	-2.34	0.30	8.83	0.32	5.83	0.31	7.29	0.38	7.82	0.78	0.02
Ni	0.33	3.29	-0.33	-3.29	0.37	10.88	0.34	7.00	0.35	8.89	0.54	7.11	0.74	0.00
C	0.32	-4.13	-0.32	4.13	270.28	2049.55	261.75	3077.10	266.04	2573.53	164.76	1529.08	0.75	0.00
Техногенное редколесье (n = 70–76)														
Объем, мм	-0.03	0.15	0.03	-0.15	31.93	30.23	32.04	29.68	31.98	29.95	25.15	23.13	0.98	0.88
Ca	4.54	5.23	-4.54	-5.23	78.18	256.82	46.01	155.15	61.99	205.99	43.50	119.82	0.00	0.00
Mg	4.78	5.63	-4.78	-5.63	15.52	68.92	8.09	36.13	11.78	52.63	9.55	35.75	0.00	0.00
K	1.75	6.24	-1.75	-6.24	12.80	152.80	10.40	62.92	11.55	108.16	8.31	88.44	0.08	0.00
Na	3.09	3.69	-3.09	-3.69	38.22	237.04	26.35	126.93	32.25	182.35	23.25	182.22	0.00	0.00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.22	1.61	-0.22	-1.61	23.23	173.04	22.15	141.63	22.68	157.02	30.34	118.84	0.83	0.11
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5.34	6.33	-5.34	-6.33	399.32	1594.03	220.52	814.26	309.92	1204.14	206.37	758.85	0.00	0.00
Cl <sup>-</sup>	3.28	4.84	-3.28	-4.84	69.92	351.69	38.98	185.00	54.45	267.78	58.09	208.62	0.00	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.40	2.36	-2.40	-2.36	28.35	42.50	20.37	19.77	24.36	31.14	20.47	57.87	0.02	0.02
Cu	4.65	4.58	-4.65	-4.58	4.53	63.05	1.08	26.07	2.83	45.19	4.51	48.91	0.00	0.00
Ni	4.79	6.48	-4.79	-6.48	6.10	81.69	2.13	26.59	4.10	55.27	5.06	51.36	0.00	0.00
C	3.18	2.43	-3.18	-2.43	301.81	1717.46	216.92	1410.04	258.51	1563.75	162.67	770.66	0.00	0.02

Примечание: ПК – под кронами, МК – между крон.

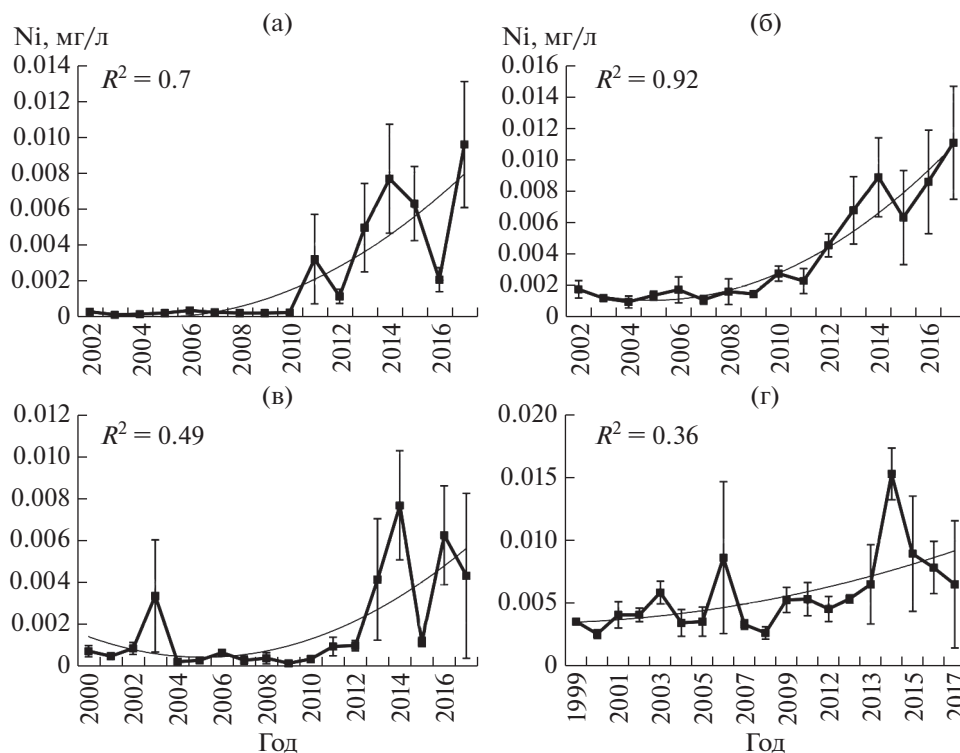


Рис. 1. Многолетняя динамика концентраций никеля в дожде на фоновой территории: а – сосняк, между крон; б – сосняк, под кронами; в – ельник, между крон; г – ельник, под кронами.

пространствах также превышен критический уровень выпадений  $\text{Cu}$  до 2 раз. В МК пространствах еловых и сосновых лесов превышений критических нагрузок не наблюдается. В сосновых и еловых лесах уровни выпадения меди, никеля и сульфатной серы существенно выше в дожде по сравнению со снегом, поскольку доля дождевых выпадений этих элементов и соединений в атмосферных выпадениях составляет в ПК пространствах ельника до 88%, сосняка – до 90%, в МК пространствах ельника – до 75%, сосняка – до 81%. Превышение критических нагрузок выпадений поллютантов наблюдается в основном в ПК пространствах и более выражено в еловых лесах.

В снеговых водах сосновых и еловых *дефолирующих лесов* ранее нами отмечалось превышение критических уровней выпадений  $\text{Cu}$  и  $\text{Ni}$  в ПК пространствах до 2.5 раз, а в МК пространствах – до 1.3 раз [26]. В дождевых водах под кронами еловых лесов наблюдается превышение критического уровня, выраженное значительно ярче, чем в снеговых: превышение выпадений  $\text{Ni}$  – до 40 раз,  $\text{Cu}$  – 73 раза и сульфатной серы – 4.5 раза, в сосновых лесах  $\text{Ni}$  – 30 раз,  $\text{Cu}$  – 50 раз, сульфатной серы – 3 раза. В сосновых и еловых лесах в МК пространствах превышение критического уровня наблюдаются только в выпадениях  $\text{Cu}$  – до 2 раз.

В снеговых водах под кронами в еловых *редколесьях* превышение критического уровня выпадений

$\text{Ni}$  и  $\text{Cu}$  составляет более 60 раз, в сосновых лесах – около 30 раз [26]. В МК ельников превышение критических значений снеговых выпадений  $\text{Ni}$  и  $\text{Cu}$  составляет более 20 раз, в сосняках – до 17 раз. Выпадения  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$  с дождевыми водами в ПК пространствах еловых лесов существенно превышали критический уровень: в 300 и 500 раз – для  $\text{Ni}$  и  $\text{Cu}$  соответственно, для сульфатной серы – в 7 раз, а в сосновых лесах выпадения  $\text{Ni}$  и  $\text{Cu}$  превышали критический уровень почти в 90 и более чем в 200 раз соответственно, сульфатной серы – в 3 раза. В МК пространствах еловых редколесий выпадения  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$  и сульфатной серы превышали уровень критических нагрузок в 20, 40 и 2 раза соответственно, а в сосновых редколесьях – в 8 и 7 раз для выпадений  $\text{Cu}$  и  $\text{Ni}$ .

#### Многолетняя динамика ANC, pH, концентраций $\text{Ni}$ , $\text{Cu}$ и сульфатов с дождем

Многолетняя динамика атмосферных выпадений соединений элементов с дождем за период с 1999 г. по 2017 г. на *фоновой территории* в сосновых и еловых лесах отличается высокой вариабельностью. Увеличение концентраций  $\text{Ni}$  отмечается как в ПК, так и в МК пространствах с 2013 г. по 2017 г. (рис. 1), а  $\text{Cu}$  (с 0.003 до 0.01 мг/л) – с 2007 г. по 2015 г., однако значимых трендов в многолетней динамике содержания  $\text{Cu}$  не обна-



ружено. Не выявлено значимых трендов и в многолетней динамике ANC и pH.

В *дефолирующих* еловых и сосновых лесах многолетняя динамика выпадений соединений элементов, как и на фоновой территории, демонстрирует высокую вариабельность, но значимых трендов в концентрациях элементов также не обнаружено. Кислотонейтрализующая способность в дожде дефолирующих сосновых и еловых лесов в ПК пространствах варьирует от  $-0.002$  до  $0.2$  ммоль/л, а в последние годы составляет  $0.5$ – $0.6$  ммоль/л. Между крон значения ANC варьируют от  $0.05$  до  $-0.01$  ммоль/л и приближаются в последние годы к фоновым значениям  $0.04$ – $0.02$  ммоль/л. Однако значимые многолетние тренды для ANC не выявлены.

В *техногенных* еловых и сосновых *редколесьях* многолетняя динамика атмосферных выпадений в виде дождя также носит изменчивый характер. Значимых многолетних трендов в концентрациях элементов как под кронами, так и между крон в сосновых и еловых редколесьях не обнаружено. Кислотонейтрализующая способность в дожде под кронами в еловых лесах не имеет отчетливых тенденций, а в МК пространствах наблюдается снижение с 2005 г. по 2012 г. (варьирует от  $-0.03$  до  $-0.1$  ммоль/л,  $R^2 = 0.43$ ). В сосновых лесах показатель ANC возрастает и постепенно приближается к фоновым значениям как в ПК (от  $-0.1$  до  $0.1$  ммоль/л), так и в МК пространствах (от  $-0.05$  до  $-0.01$  ммоль/л).

Таким образом, статистически значимые тренды многолетних изменений состава атмосферных выпадений не отмечены, однако выявлено выраженное возрастание концентраций никеля в дождевых выпадениях сосновых и еловых лесов в фоновых условиях. Это объясняется повышением уровня содержания поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния, и свидетельствует о возрастании техногенных нагрузок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами впервые дана оценка состава дождевых выпадений в хвойных лесах в условиях аэротехногенного загрязнения на основе многолетних (15–18 лет) данных, выявлены элементы мозаики хвойных лесов, которые позволяют проводить наиболее раннюю диагностику критических нагрузок.

Дождевые воды на всех стадиях дигрессии в хвойных лесах Кольского полуострова характеризуются выраженной пространственной изменчивостью на внутри- (подкروновые и межкروновые пространства) и межбиогеоценоотическом (еловые и сосновые леса) уровнях. Высокие концентрации и выпадения элементов в подкроновых пространствах еловых и сосновых лесов по срав-

нению с межкроновыми объясняются их смывом и выщелачиванием из крон деревьев. Более высокие концентрации и выпадения элементов в еловых лесах по сравнению с сосновыми обусловлены большей поверхностью и более выраженными барьерными функциями крон ели.

Воздушное промышленное загрязнение оказывает существенное влияние на формирование состава дождевых вод, которое выражается в повышении концентраций тяжелых металлов и кислотообразующих веществ и выщелачивании элементов питания (Ca и Mg) из древесного полога. Повышение кислотности дождевых выпадений в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях по сравнению с фоновой территорией наиболее ярко выражено под кронами деревьев.

Выпадения основных поллютантов с дождевыми водами превышали годовые критические уровни уже в фоновых условиях и, особенно, в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях. Превышение критических уровней в дождевых водах выражено значительно ярче, чем в снеговых. Учет внутрибиогеоценоотических и межбиогеоценоотических различий в составе атмосферных выпадений позволяет провести более раннюю и точную диагностику превышения критических нагрузок на всех стадиях дигрессии. Данные об атмосферных выпадениях под кронами еловых лесов являются более информативными для выявления превышений уровня критических нагрузок как в фоновых условиях, так и на стадиях выраженной техногенной дигрессии.

Многолетняя динамика выпадений элементов в дождевых водах сосновых и еловых лесов отличается высокой вариабельностью как под кронами, так и между крон деревьев, однако многолетние тренды в условиях высокого уровня загрязнения не выражены.

В фоновых условиях выявлено повышение концентраций никеля в 2013–2017 гг., что объясняется возрастанием содержания поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания “Динамика восстановления биоразнообразия и функций наземных экосистем Субарктики в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов” (AAAA-A18-118021490070-5) и государственного задания “Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем” (AAAA-A18-118052400130-7), а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00170 мол\_а и частично грант № 18-05-60142/18).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С. и др. Рассеянные элементы в бореальных лесах / Отв. ред. Исмаев А.С. М.: Наука, 2004. 409 с.
2. Шильцова Г.В. Роль сосновых биогеоценозов заповедника "Кивач" в формировании кислотности и состава природных вод // Труды Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 2006. Вып. 10. С. 173–179.
3. Gandois L., Tipping E., Dumat C., Probst A. Canopy influence on trace metal atmospheric inputs on forest ecosystems: Speciation in throughfall // Atmospheric Environment. 2010. V. 44. Issue 6. P. 824–833.
4. Мартынюк А.А., Доронищева Е.В., Рыкова Т.В. Изменение химического состава природных осадков под пологом сосновых насаждений в условиях техногенного загрязнения среды // Лісовий журнал. 2011. № 1. С. 8–11.
5. De Vries W., Dobbertin M.H., Solberg S. et al. Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystems in Europe: an overview // Plant and Soil. 2014. (First Online).
6. Herrmann M., Pust J., Pott R. The chemical composition of throughfall beneath oak, birch and pine canopies in Northwest Germany // Plant Ecology. 2006. V. 184. P. 273–285.
7. Kowalska A., Astel A., Boczoń A., Polkowska Ż. Atmospheric deposition in coniferous and deciduous tree stands in Poland // Atmospheric Environment. 2016. V. 133. P. 145–155.
8. Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г. Влияние древесных растений на химический состав атмосферных осадков в процессе восстановления среднетаежных лесов // Лесоведение. 2011. № 3. С. 34–43.
9. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.
10. Fischer R., Mues V., Ulrich E. et al. Monitoring of atmospheric deposition in European forests and an overview on its implication on forest condition // Applied Geochemistry. 2007. V. 22. Issue 6. P. 1129–1139.
11. Pascaud A., Sauvage S., Coddeville P. et al. Contrasted spatial and long-term trends in precipitation chemistry and deposition fluxes at rural stations in France // Atmospheric Environment. 2016. V. 146. P. 28–43.
12. Даувальтер В.А., Даувальтер М.В., Салтан Н.В., Семенова Е.Н. Влияние выбросов горно-металлургического комбината на химический состав атмосферных выпадений (Мончегорский полигон) // Геоэкология. Сер. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2009. № 3. С. 228–240.
13. Kashulina G., Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the "Severonikel" industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // Atmospheric Environment. 2014. V. 89. P. 672–682.
14. Цветков В.Ф., Цветков И.В. Промышленное загрязнение окружающей среды и лес. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 312 с.
15. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Ч. 1. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. 216 с.
16. Кислотные осадки и лесные почвы / Под ред. Никонова В.В. и Копчик Г.Н. Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 1999. 320 с.
17. Lukina N.V., Nikonov V.V. Degradational succession of forest ecosystems in the surroundings of Cu-Ni smelter in the Kola Peninsula // Proceedings of 28th Annual Meeting. May, 2003. Sudbury, Ontario [CDROM].
18. Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги. Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 1998. 316 с.
19. Husson F., Le S., Pages J. Exploratory multivariate analysis by example using R. 2nd ed. Chapman & Hall/CRC, 2017. 248 p.
20. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2017. URL: <http://www.R-project.org>.
21. Helmissaari H.S., Mälkönen E. Acidity and nutrient content of throughfall and soil leachate in three *Pinus sylvestris* stands // Scandinavian Journal of Forest Research. 1989. V. 4. Issue 1–4. P. 13–28.
22. Gundersen P., Sevel L., Christiansen J. R. et al. Do indicators of nitrogen retention and leaching differ between coniferous and broadleaved forests in Denmark? // Forest Ecology and Management. 2009. V. 258. P. 1137–1146.
23. Korhola A., Weckstrom J., Nyman M. Predicting the long-term acidification trends in small subarctic lakes using diatoms // J. of Applied Ecology. 1999. V. 36. P. 1021–1034.
24. 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. 46 p.
25. Ершов В.В., Лукина Н.В., Орлова М.А. и др. Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината // Сибирский экологич. журн. 2019. №1. С. 119–132.
26. 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. J. of Ecology. 2016. V. 47. № 1. P. 46–52.