

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЧВЫ И РАСТЕНИЙ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЛАПЛАНДСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

COMPOSITION OF SOIL AND PLANTS IN THE FOREST ECOSYSTEMS OF THE LAPLAND NATURE RESERVE

T. Sukhareva

Summary. The state of forest ecosystems on stationary test areas on the territory of the Lapland State Biosphere Reserve, located in the zone of influence of atmospheric emissions of the Severonikel copper-nickel combine (Murmansk region), was studied. The objects of the study were spruce and pine forests in background and disturbed ecosystems. The dynamics of the composition of soil, plants and lichens under conditions of technogenic pollution is shown.

Keywords: forest ecosystems, soils, plants, air pollution, Arctic.

Сухарева Татьяна Алексеевна

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Институт проблем промышленной экологии
Севера, ФИЦ КНЦ РАН

г. Апатиты
s.tat.a@mail.ru

Аннотация. Изучено состояние лесных экосистем на стационарных пробных площадях на территории Лапландского государственного биосферного заповедника, расположенного в зоне влияния атмосферных выбросов медно-никелевого комбината «Североникель» (Мурманская область). Объектами исследования послужили еловые и сосновые леса в фоновых и нарушенных экосистемах. Показана динамика состава почвы, растений и лишайников в условиях техногенного загрязнения.

Ключевые слова: лесные экосистемы, почвы, растения, воздушное загрязнение, Арктика.

Введение

Техногенное воздействие на окружающую природную среду является глобальной проблемой современного природопользования. Мурманская область — самый северный регион европейской части России и полностью входит в Арктическую зону РФ. В настоящее время лесные арктические экосистемы подвергаются множественному стрессу, представляющему собой комбинацию естественных и антропогенных факторов. В связи с интенсивным развитием отраслей промышленности, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, обостряется проблема изучения и сохранения лесов. Особенно актуальна эта проблема для регионов Крайнего Севера, где в силу своих биологических особенностей лесные экосистемы отличаются повышенной уязвимостью.

В центральной части Мурманской области основным источником аэротехногенного загрязнения является медно-никелевый комбинат «Североникель», длительное воздействие со стороны которого привело к деградации экосистем на значительных по площади территориях, в том числе на территории Лапландского государственного биосферного заповедника, который является крупнейшим в европейской части России. Воз-

душное загрязнение, представленное главным образом SO_2 с примесью тяжелых металлов (Ni, Cu, Co и др.), распространяется на значительные расстояния и является причиной нарушения биогеохимических циклов химических элементов, изменения состава атмосферных выпадений, почв и растений, основной предпосылкой длительного существования лесных биогеоценозов является стабильность биогеохимических циклов. Это подтверждается рядом исследований, в том числе проведенных для северных регионов (Лукина, Никонов, 1998; Лянгузова, 2010, Копчик, 2012). Исследование элементного состава растений необходимо для более полной характеристики распределения химических элементов в природных и антропогенных ландшафтах, поскольку растения являются важнейшим звеном биологического круговорота веществ. Изменение условий произрастания растений под влиянием аэротехногенного загрязнения и климатических изменений может приводить к нарушениям экосистемных функций лесов: изменять круговорот биогенных элементов, плодородие почв, продуктивность лесных экосистем.

Анализ результатов многочисленных исследований показывает большой интерес авторов к изменению состава и свойств почвы, растений под воздействием природных и антропогенных факторов (Воробейчик

и др., 2014; Копчик и др., 2016; Михайлова и др., 2020; Salemaa et al., 2004; Zakrzewska, Klimek, 2018). Однако недостаточно исследований, при выявляются долговременные изменения в условиях меняющихся факторов среды. Такие исследования возможны только при проведении длительных стационарных наблюдений на одной и той же территории.

Цель работы — изучение состояния северотаёжных лесов на основе данных многолетнего мониторинга почвы, древесных растений, напочвенного покрова северотаёжных лесов в условиях долговременного атмосферного загрязнения на пробных площадях постоянного наблюдения в Лапландском заповеднике (Мурманская область).

Объекты и методы исследований

Исследования состояния северотаёжных лесов проводились на территории Лапландского заповедника, который находится в центральной части Мурманской области. Леса заповедника представляют типичные для бореальной зоны формации с преобладанием низко продуктивных хвойных насаждений северотаёжного облика и занимают около половины территории (Исаева, Костина, 2012). Лесные экосистемы заповедника подвергаются воздействию атмосферных выбросов комбината «Североникель» (АО «Кольская ГМК»). В настоящее время ежегодный объём выбросов SO_2 и твердых веществ составляет соответственно 35–37 и 2,9–3,4 тыс. тонн, т.е. произошло 5–9-кратное снижение по сравнению с периодом 1981–1990 гг., когда объём атмосферных выбросов превышал в среднем 220 тыс.т., твердых веществ — 16 тыс. тонн (Лянгузова, 2021). Почвы в районе исследования представлены Al-Fe-гумусовыми подзолами, развитыми на ледниковых моренных песчаных отложениях (Переверзев, 2011). В современной классификации (Классификация..., 1997) подзолы, имеющие профиль O-E-BH-C, выделяются на уровне типа и входят в отдел альфегумусовых почв ствола постлитогенных почв (Переверзев, 2007).

Пробные площадки постоянного наблюдения (ППН) на территории заповедника заложены в 1993 г. в ельнике зеленомошно-кустарничковом (ППН 8–93) и сосняке лишайниково-кустарничковом (ППН M1K5) на расстоянии 31 км от комбината «Североникель». Почти 30 лет сотрудники лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН проводят мониторинг на ППН на территории заповедника. Еловые и сосновые леса на ППН трансформированы и выделены как стадия дефолирующих лесов (Лукина, Никонов, 1998). На данной стадии наблюдается повышение кислотности почв, обеднение их элемента-

ми питания, нарушение минерального питания растений, дефолиация, т.е. преждевременное опадение хвои деревьев (Лукина и др., 2005). Установлено, что в дефолирующих лесах содержание поллютантов в атмосферных выпадениях, почвенных водах и хвое древесных растений в сосновых и еловых лесах возрастает (Ershov et al., 2020; Сухарева и др., 2020). Фоновые пробные площадки расположены на юго-западе Мурманской области (Кандалакшский район), на значительном удалении от источника аэротехногенного загрязнения, в ельнике лишайниково-кустарничково-зеленомошном (167 км от комбината) и сосняке лишайниково-кустарничковом (171 км от комбината). Почвы на ППН под сосновыми лесами представлены иллювиально-железистыми подзолами (Carbic Podzols, WRB), под еловыми — иллювиально-гумусовыми подзолами (Rustic Podzols, WRB).

Исследования почв и растений на ППН выполняли в 2005–2008 и 2017–2019 гг. в конце вегетационного периода (август). Отбор образцов почвы проводили по почвенным горизонтам с учётом парцеллярной структуры биогеоценоза. В лабораторных условиях почвенные образцы высушивали при комнатной температуре, а затем просеивали. Аналитической обработке подвергали мелкозем (фракция < 1.0 мм). Для определения концентрации доступных соединений элементов образцы почв обрабатывали 1M CH_3COONH_4 (pH = 4.65). Для органогенных горизонтов использовали те же соотношения почвы и вытеснителя, что и при определении pH для минеральных горизонтов — 1:10. Хвою ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), листья березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) отбирали в 5 кратной повторности из верхней трети кроны. Образцы растений напочвенного покрова — вороники (*Empetrum hermaphroditum* Hager.), черники (*Vaccinium myrtillus* L.), брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.), зеленого мха *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и напочвенного лишайника *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vezda в 3-кратной повторности в конце вегетационного периода (августе) в межкрупных пространствах. В лаборатории хвою ели и сосны разбирали на возрастные классы, у брусники и вороники отделяли листья текущего года, у зеленых мхов — побеги текущего года. Содержание химических элементов в растительных образцах определяли после разложения концентрированной азотной кислотой (мокрое озоление). Металлы (Ca, Mg, K, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn) в образцах определяли методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии, K — атомно-эмиссионной спектrophотометрии, P — фотоколориметрическим методом, S — турбидиметрическим методом. Образцы растений и лишайников высушивали при комнатной температуре, размалывали. Растительные образцы перед химическим анализом не отмывали.

Таблица 1. Содержание подвижных форм элементов минерального питания в почве фоновых и дефолирующих еловых лесов (кустарничково-зеленомошная парцелла), 2019 г., мг кг⁻¹

Горизонт	Границы горизонта, см	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al
Фон								
L	0–0.6	6316 264	1741.9 143.0	780.0 11.5	1191.2 172.8	3278.6 31.3	150.4 16.8	32.4 6.2
FH	0.6–4	1312 115	721.3 160.3	193.866.9	262.2 72.9	473.8 132.9	52.0 14.4	187.5 10.2
E	4–12	10 1	5.4 0.7	2.8 0.1	5.4 0.7	10.2 1.8	5.7 1.9	221.2 72.0
B	12–43	26 2	17.7 3.4	14.7 0.4	7.5 1.2	25.8 7.0	40.5 11.6	3964.6 924.2
C	>43	13 1	8.1 1.3	8.0 0.3	14.6 2.4	0.5 0.1	29.8 3.3	1234.7 367.5
Лапландский заповедник (ППН 8–93)								
L	0–0.4	3960 828	1422.6 23.2	485.1 68.8	756.4 30.5	1031.3 211.6	264.4 28.3	35.1 6.7
FH	0.4–7	2766 107	1007.0 101.4	76.2 23.5	258.3 21.2	50.4 17.8	174.5 16.6	896.5 245.6
E	7–15	19 4	12.6 0.7	2.9 1.0	3.5 1.5	0.23 0.06	11.9 1.1	138.0 31.8
B	15–40	32 6	11.9 2.5	5.3 0.4	3.9 1.8	4.48 1.9	62.9 8.2	2343.3 920.6

Примечание: здесь и в табл. 2–4: над чертой — среднее арифметическое;
под чертой — стандартная ошибка

Таблица 2. Содержание подвижных форм элементов минерального питания в почве фоновых и дефолирующих сосновых лесов (лишайниковая парцелла), 2019 г., мг кг⁻¹

Горизонт	Глубина, см	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al
Фон								
L	0–1	2694 230	706.8 53.2	241.5 39.2	415.6 14.9	597.5 62.9	93.9 5.0	117.0 2.4
FH	1–7	1933 274	480.0 15.8	141.516.7	220.6 18.1	190.4 71.4	79.8 2.6	78.0 5.8
E	7–16	28 4	11.4 2.7	2.5 0.3	5.8 1.7	1.9 0.8	1.8 0.9	154.5 18.9
B	16–30	16 1	9.4 2.3	18.0 6.6	3.5 0.3	10.1 1.1	61.4 2.8	2700.0 445.6
C	>30	13 2	7.1 0.7	17.6 3.7	2.5 0.6	7.9 1.4	9.3 1.6	816.3 97.7
Лапландский заповедник (ППН М1К5)								
L	0–0.5	1070 134	698.7 21.0	145.2 9.9	114.14.7	106.9 25.6	146.4 9.4	168.7 41.0
FH	0.5–4.5	1440 254	252.5 12.8	45.1 2.2	147.9 27.8	89.7 8.1	72.6 4.9	121.8 8.6
E	4.5–10	14 6	7.4 1.6	1.6 0.2	2.7 0.7	0.6 0.2	2.6 0.4	69.8 13.3
B	10–39	10 1	2.9 0.3	8.8 3.2	1.5 0.2	13.9 3.9	65.1 2.9	1123.4 99.3
C	>39	13 2	2.9 0.4	7.4 0.4	1.7 0.7	6.2 0.1	3.0 0.4	318.3 46.5

Таблица 3. Содержание подвижных форм ТМ в почве фоновых и дефолирующих еловых лесов (кустарничково-зеленомошная парцелла), 2019 г., мг

Горизонт	Границы горизонта, см	Fe	Zn	Cu	Ni
Фон					
L	0–0.6	1.0 0.3	160.3 0.1	0.76 0.24	0.85 0.13
FH	0.6–4	25.2 9.9	41.1 6.9	0.57 0.10	0.21 0.02
E	4–12	108.7 9.6	0.3 0.1	0.15 0.09	0.06 0.01
B	12–43	706.8 52.3	7.2 2.4	0.29 0.10	0.44 0.06
C	>43	83.4 2.6	0.5 0.1	0.26 0.05	0.23 0.06
Лапландский заповедник (ППН 8–93)					
L	0–0.4	1.2 0.2	78.5 5.8	5.95 0.51	32.39 2.02
FH	0.4–7	90.2 9.0	26.6 1.7	15.02.19	43.84 4.25
E	7–15	39.5 4.1	0.39 0.06	0.66 0.26	0.91 0.16
B	15–40	497.1 117.6	0.86 0.17	1.06 0.28	1.26 0.20

Таблица 4. Содержание подвижных форм ТМ в почве фоновых и дефолирующих сосновых лесов (лишайниковая парцелла), 2019 г., мг кг⁻¹

Горизонт	Глубина, см	Fe	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	Co
Фон								
L	0–1	5.2 1.4	37.47 5.39	0.45 0.05	0.60 0.06	1.203 0.072	0.097 0.013	0.065 0.022
FH	1–7	12.0 3.3	19.29 1.50	0.27 0.02	0.48 0.16	8.345 2.097	0.135 0.022	0.113 0.022
E	7–16	21.8 2.4	0.22 0.02	0.03 0.01	0.08 0.00	0.635 0.191	0.003 0.001	0.016 0.004
B	16–30	192.8 62.2	0.91 0.16	0.25 0.05	0.21 0.06	0.413 0.089	0.008 0.001	0.276 0.030
C	>30	57.9 3.3	0.03 0.00	0.11 0.03	0.22 0.03	0.140 0.011	0.012 0.001	0.119 0.047
Лапландский заповедник (ППН М1К5)								
L	0–0.5	12.8 2.9	15.9 0.03	20.98 1.67	45.40 1.78	0.158 0.037	8.767 3.260	1.038 0.199
FH	0.5–4.5	15.7 1.5	17.6 1.2	16.54 4.65	57.54 1.15	0.325 0.007	14.789 3.382	2.080 0.019
E	4.5–10	19.9 8.2	0.03 0.00	0.35 0.10	0.42 0.16	0.007 0.002	0.412 0.055	0.022 0.006
B	10–39	132.2 14.6	0.21 0.02	0.34 0.12	0.37 0.10	0.003 0.000	0.221 0.003	0.164 0.032
C	>39	37.2 5.7	0.13 0.03	0.29 0.02	0.12 0.04	0.001 0.000	0.001 0.000	0.091 0.025

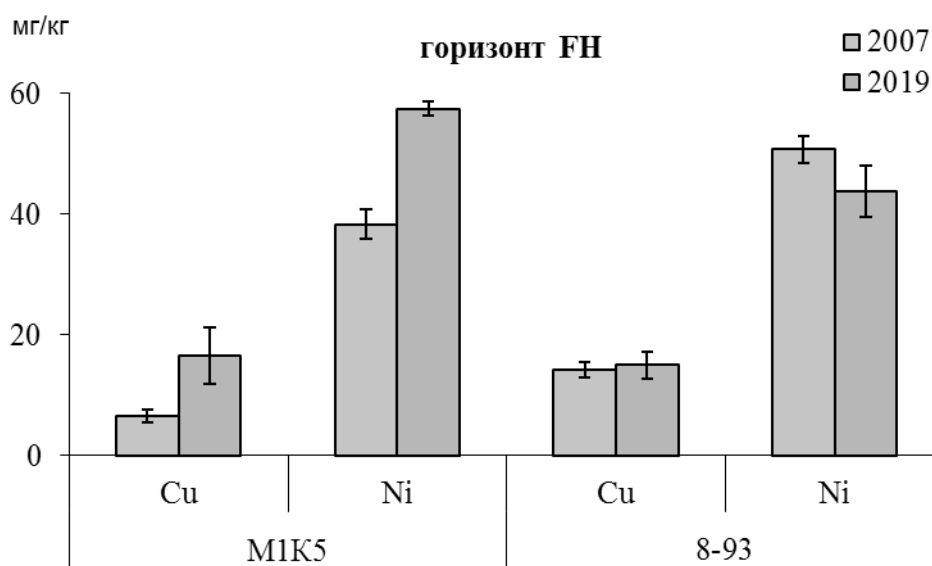


Рис. 1. Содержание подвижных форм Ni и Cu в органическом горизонте почвы на пробных площадях, расположенных на территории Лапландского заповедника, мг кг⁻¹

Полученные данные обрабатывались с помощью программного обеспечения MS Excel. Для сравнения содержания химических элементов в почве, растениях, лишайниках в условиях разного уровня атмосферного загрязнения использовали непараметрический статистический критерий U-критерия Манна-Уитни в Statistica 13.3.

Результаты исследований

Почвы

В органическом горизонте (подгоризонты L, FH) еловых и сосновых лесов из элементов доминирует кальций и калий, минеральных горизонтов E, C — алюминий и железо. В пределах органического горизонта наблюдается снижение концентрации Ca, K, P, Mg, Mn, Zn, S ($p < 0.05$). от L к FH подгоризонту как фоновых еловых и сосновых лесах, так и в дефолирующих лесах на территории Лапландского заповедника (табл. 1,2).

В подгоризонте L сосновых лесов концентрации доступных соединений Al и Fe выше, чем в подгоризонте FH. В органическом горизонте еловых лесов отмечены более высокие концентрации большинства элементов питания по сравнению с сосновыми: в подгоризонте L — Ca, K, P, Mg, Mn, S, Zn, в подгоризонте FH — Mn, Zn, Al, Fe — ($p < 0.05$). В подзолистом горизонте (гор. E) почвы фоновых хвойных лесов концентрации доступных элементов питания Ca, K, P, Mg, Mn, S, Zn снижаются ($p < 0.05$). В иллювиальном горизонте (гор. B) вновь про-

исходит увеличение концентрации P, Mn, S, Zn ($p < 0.05$). Максимальное содержание доступных соединений Al и Fe наблюдается в иллювиальном горизонте ($p < 0.05$).

В органических горизонтах почв дефолирующих лесов, на территории Лапландского заповедника (ППН 8–93 и M1K5), наблюдается снижение содержания доступных для растений соединений Ca, Mg, K, P, Mn, Zn, увеличение содержания Al, Fe, Ni, Cu, Cd (табл. 1–4), Co по сравнению с фоном ($p < 0.05$). Снижение содержания основных катионов в органических горизонтах почв являются следствием катионообменных реакций в почвенном поглощающем комплексе: основные катионы вытесняются “кислыми” — ионами водорода и алюминия. Кроме того, хвоя ели и сосны, ассимилирующие органы кустарничков значительно обедняются кальцием и магнием, что также может являться причиной снижения содержания доступных соединений этих элементов в органических горизонтах почв. Снижение содержания марганца и цинка обусловлено выносом этих элементов из органического горизонта в результате интенсификации потока кислотообразующих веществ из атмосферы. Другой причиной может быть уменьшение содержания этих элементов в растительном опаде. Пониженные содержания фосфора также связаны с их активным вымыванием из подстилки. Увеличение содержания тяжелых металлов связано с атмосферным загрязнением. Несмотря на значительное поступление соединений серы с атмосферными выпадениями и интенсивным вымыванием их из крон деревьев, содержание доступных для растений соединений серы в ор-

Таблица 5. Содержание элементов питания в ассимилирующих органах растений еловых лесов (2017–2019 гг.)

Растения	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al
	г/кг	г/кг	г/кг	г/кг	г/кг	г/кг	мг/кг
Фон							
Ель, хвоя:							
текущая	3.0±0.4	7.9±0.3	2.0±0.1	0.9±0.1	0.9±0.1	0.5±0.1	55±11
однолетняя	5.0±0.6	6.9±0.5	1.9±0.2	0.8±0.1	1.4±0.1	1.3±0.1	185±49
многолетняя	14.4±1.3	3.3±0.3	1.3±0.1	0.7±0.1	3.0±0.2	1.4±0.1	19±2
Береза	5.5±0.2	7.1±0.2	2.0±0.1	2.5±0.1	2.0±0.1	0.8±0.1	185±27
Черника	8.7±0.4	6.8±0.4	1.9±0.1	1.8±0.1	3.0±0.3	1.9±0.2	79±9
Брусника	4.3±0.1	5.3±0.4	1.5±0.1	1.4±0.1	1.6±0.1	1.4±0.2	20±2
Вороника	4.5±0.2	5.6±0.3	1.7±0.1	1.8±0.1	0.4±0.1	1.3±0.2	73±4
Зеленые мхи	1.9±0.1	6.1±0.1	1.6±0.1	2.2±0.5	0.7±0.0	0.8±0.1	33±6
Лапландский заповедник (ППН 8–93)							
Ель, хвоя:							60±10
текущая	2.8±0.2	8.2±0.6	1.7±0.1	0.8±0.1	0.8±0.1	0.5±0.1	116±38
однолетняя	4.4±0.2	5.2±0.2	1.2±0.1	0.9±0.1	0.5±0.1	0.6±0.1	226±66
многолетняя	8.6±0.9	3.3±0.3	0.8±0.1	0.5±0.1	0.6±0.1	0.8±0.1	26±5
Береза	6.8±0.3	6.2±0.5	1.8±0.1	2.2±0.1	1.2±0.1	1.0±0.1	115±2
Черника	6.6±0.1	8.9±0.3	1.8±0.1	1.7±0.1	2.8±0.1	1.9±0.1	87±5
Брусника	4.4±0.1	5.7±0.2	1.2±0.1	1.4±0.1	1.6±0.1	1.8±0.1	24±1
Вороника	4.6±0.3	7.0±0.5	1.5±0.1	1.3±0.1	0.4±0.1	1.0±0.1	60±6
Зеленые мхи	6.4±0.3	7.3±0.6	1.1±0.1	2.2±0.1	0.6±0.1	1.2±0.1	60±10

Примечание: здесь и в табл. 6–8 приведены средние значения и ± стандартная ошибка.

Таблица 6. Содержание элементов питания в ассимилирующих органах растений и талломах лишайников сосновых лесов (2017–2019 гг.)

Растения, лишайники	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al
	г/кг	г/кг	г/кг	г/кг	г/кг	г/кг	мг/кг
Фон							
Сосна, хвоя:							
текущая	1.4±0.1	7.5±0.5	2.0±0.1	1.0±0.1	0.4±0.0	0.5±0.1	102±9
однолетняя	2.1±0.1	4.2±0.2	1.1±0.1	0.8±0.1	0.6±0.0	0.7±0.1	181±15
многолетняя	2.9±0.1	3.4±0.1	1.0±0.1	0.7±0.1	0.8±0.0	0.7±0.1	212±18
Береза	8.6±0.1	9.2±0.6	2.2±0.1	2.5±0.1	2.0±0.1	0.8±0.1	13±1
Черника	7.1±0.5	7.5±0.8	1.6±0.1	2.0±0.1	1.3±0.1	1.5±0.1	123±15
Брусника	4.7±0.1	5.1±0.3	1.4±0.1	1.3±0.1	1.1±0.1	1.1±0.1	66±2
Вороника	5.0±0.3	6.8±0.2	1.7±0.1	1.6±0.1	0.3±0.1	1.1±0.1	17±2
Лишайники	0.4±0.0	1.2±0.1	0.4±0.0	0.2±0.0	0.1±0.0	0.2±0.0	74±2
Лапландский заповедник (ППН М1К5)							
Сосна, хвоя:							
текущая	1.7±0.1	6.2±0.4	1.6±0.1	1.0±0.1	0.6±0.1	1.0±0.1	85±7
однолетняя	2.2±0.1	3.4±0.2	1.0±0.1	0.8±0.1	0.6±0.1	0.7±0.1	110±15
многолетняя	3.4±0.3	2.8±0.1	0.9±0.0	0.5±0.1	0.6±0.1	0.7±0.1	168±19
Береза	5.0±0.3	5.9±0.1	2.5±0.1	2.0±0.1	1.1±0.1	1.0±0.1	29±1
Черника	7.4±0.4	5.9±0.4	1.7±0.1	2.1±0.1	1.8±0.2	1.3±0.2	134±9
Брусника	4.3±0.4	4.3±0.2	1.0±0.1	1.4±0.1	0.8±0.1	1.9±0.1	79±2
Вороника	4.5±0.1	6.0±0.3	1.4±0.1	1.2±0.1	0.3±0.1	1.1±0.2	24±2
Лишайники	0.8±0.1	7.1±0.1	0.4±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.3±0.0	249±18

Таблица 7. Содержание ТМ в ассимилирующих органах растений (2017–2019 гг.)

Растения	Fe	Zn	Cu	Ni	Co	Cd	Pb
	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг
Фон							
Ель, хвоя:							
текущая	22±1	41±4	2.6±0.1	3.6±0.6	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
однолетняя	25±2	50±7	2.2±0.2	2.1±0.2	0.02±0.00	0.02±0.01	0.02±0.00
многолетняя	41±3	77±13	1.5±0.1	4.0±0.5	0.03±0.00	0.03±0.01	0.06±0.01
Береза	39±1	160±30	4.3±0.1	3.0±0.3	0.08±0.01	0.17±0.01	0.26±0.02
Черника	56±3	14±1	6.3±0.1	1.7±0.1	0.01±0.00	0.01±0.00	0.14±0.03
Брусника	21±1	19±2	3.8±0.2	1.6±0.1	0.01±0.00	0.01±0.00	0.07±0.01
Вороника	42±8	19±1	6.9±0.3	3.9±0.6	0.00±0.00	0.00±0.00	0.09±0.01
Зеленые мхи	70±3	34±1	5.4±0.3	3.2±0.3	0.13±0.01	0.06±0.00	0.68±0.08
Лапландский заповедник (ППН 8–93)							
Ель, хвоя:							
текущая	25±1	29±2	4.0±0.3	25.6±1.8	0.18±0.02	0.00±0.00	0.04±0.01
однолетняя	31±2	28±3	3.8±0.4	28.9±3.2	0.21±0.02	0.00±0.00	0.07±0.01
многолетняя	38±2	27±3	4.4±0.4	30.9±2.1	0.21±0.02	0.00±0.00	0.18±0.03
Береза	52±2	142±5	9.0±0.2	30.3±0.8	0.06±0.00	0.13±0.01	0.10±0.01
Черника	50±4	11±1	9.7±0.4	17.1±1.6	0.25±0.03	0.00±0.00	0.06±0.01
Брусника	30±1	18±1	6.2±0.4	8.9±0.4	0.18±0.02	0.01±0.00	0.06±0.00
Вороника	35±2	10±1	6.5±0.8	14.3±1.4	0.16±0.01	0.00±0.00	0.07±0.01
Зеленые мхи	30±1	19±1	58±3	9.4±1.2	0.10±0.01	0.20±0.03	0.05±0.00

Таблица 8. Содержание ТМ в ассимилирующих органах растений и талломах лишайников сосновых лесов (2017–2019 гг.)

Растения, лишайники	Fe	Zn	Cu	Ni	Co	Cd	Pb
	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг
Фон							
Сосна, хвоя:							
текущая	30±4	31±3	3.7±0.3	2.5±0.2	0.04±0.01	0.03±0.01	0.02±0.00
однолетняя	36±3	34±3	2.5±0.1	0.9±0.2	0.06±0.01	0.04±0.01	0.05±0.01
многолетняя	44±2	38±5	2.4±0.1	1.1±0.2	0.07±0.01	0.04±0.01	0.11±0.01
Береза	53±2	204±30	4.8±0.2	3.0±0.3	0.09±0.03	0.12±0.01	0.04±0.01
Черника	46±2	13±2	6.2±0.2	1.6±0.1	0.00±0.00	0.00±0.00	0.01±0.00
Брусника	25±1	23±1	4.9±0.2	0.2±0.1	0.00±0.00	0.00±0.00	0.01±0.00
Вороника	31±4	18±1	7.6±0.5	2.9±0.8	0.01±0.00	0.00±0.00	0.03±0.01
Лишайники	130±9	11±1	1.1±0.0	1.8±0.2	0.08±0.01	0.03±0.00	0.59±0.04
Лапландский заповедник (ППН М1К5)							
Сосна, хвоя:							
текущая	47±2	21±3	8.3±0.2	26.0±2.2	0.35±0.07	0.00±0.00	0.05±0.01
однолетняя	31±2	21±3	10.2±0.5	30.5±2.3	0.48±0.04	0.00±0.00	0.12±0.01
многолетняя	80±4	13±1	12.7±0.3	40.2±3.0	0.60±0.02	0.00±0.00	0.30±0.02
Береза	59±1	125±9	9.4±0.2	37.8±1.8	0.64±0.05	0.17±0.01	0.10±0.02
Черника	42±2	12±1	9.9±0.2	18.5±1.2	0.14±0.01	0.01±0.00	0.05±0.01
Брусника	28±1	17±1	5.4±0.2	11.0±0.4	0.08±0.01	0.00±0.00	0.04±0.01
Вороника	40±2	11±1	6.3±0.3	14.0±0.4	0.11±0.01	0.00±0.00	0.07±0.01
Лишайники	791±9	10±1	29.7±0.7	59.5±2.0	1.42±0.07	0.04±0.00	1.37±0.06

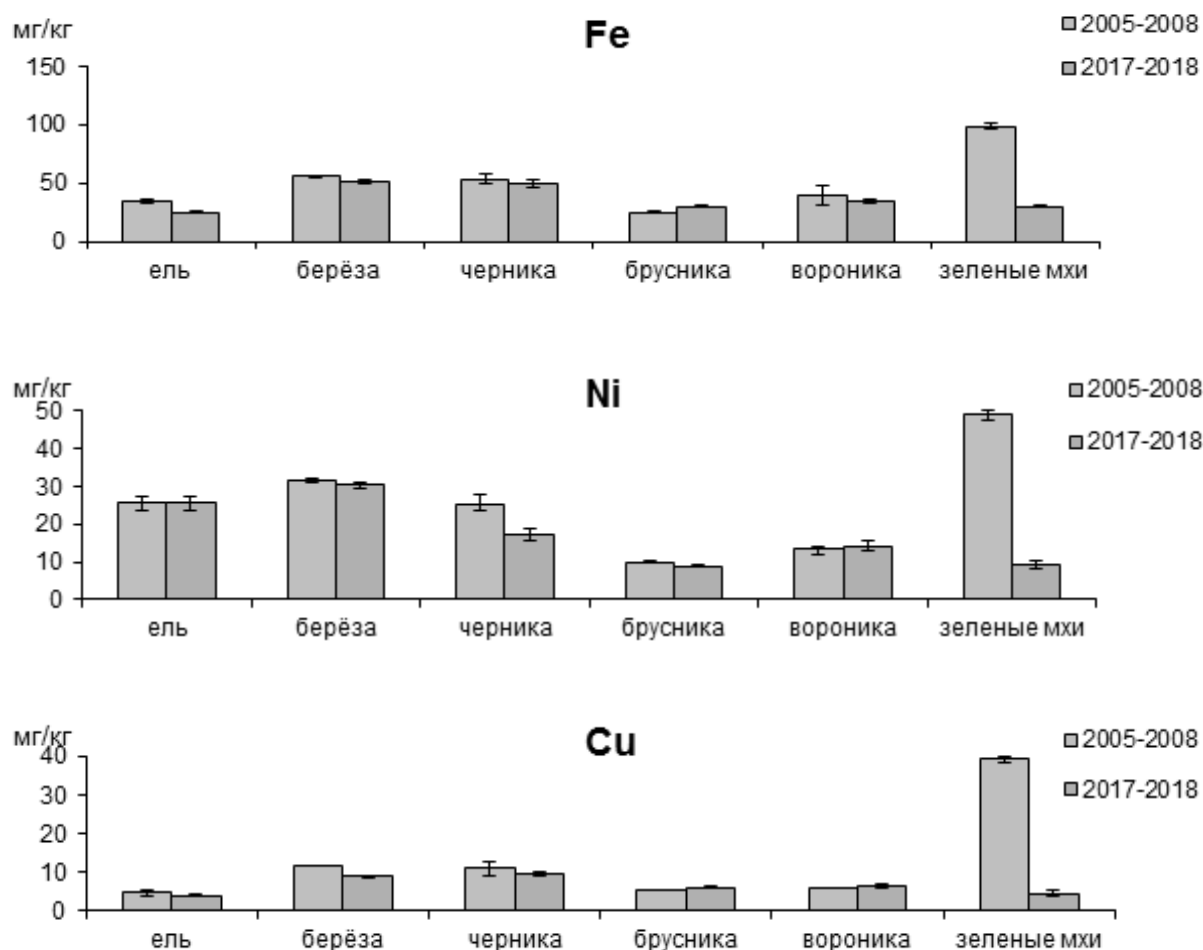


Рис. 2. Содержание Fe, Cu, Ni в листьях (хвое) растений на ППН8–93 (Лапландский заповедник) в разные периоды исследований (2005–2008 и 2017–2018 гг.)

ганогенных горизонтах не увеличивается. Это можно объяснить высокой миграционной способностью этого элемента. В почвенных водах фиксируется резкое возрастание концентраций сульфатов, которые способствуют миграции основных катионов (Лукина, Никонов, 1996).

В фоновых условиях содержание никеля и меди низкое и варьирует в органическом горизонте в пределах 0.25–0.67 мг/кг, в минеральных горизонтах — 0.02–0.50 мг/кг. В дефолирующих лесах Лапландского заповедника содержания никеля многократно превышают фоновые значения, с максимальным накоплением в органическом горизонте почвы. Данные за 2 периода наблюдений (2007 и 2019 гг.) показали, что содержание доступных соединений никеля и меди в почве фоновых районах остается на низком уровне. На рис. 1 представлена динамика содержания тяжелых металлов (ТМ) в органическом горизонте почвы на территории заповедника в разные периоды исследования.

В почве сохраняются высокие концентрации Ni и Cu, которые многократно превышают фоновые значения. В дефолирующих еловых лесах (ППН8–93) в 2019 г. содержание никеля несколько снизилось, а меди осталось сопоставимо с предыдущим периодом исследования (2007 г.). В дефолирующих сосновых лесах (ППН М1К5) произошло увеличение концентрации меди с 6.35 мг/кг (2007 г.) до 16.54 мг/кг (2019 г.), никеля с 38.40 до мг/кг (2007 г.) до 57.54 мг/кг (2019 г.)

Растения и лишайники

В табл. 5–8 приведены данные по содержанию макро- и микроэлементов в листьях (хвое) доминирующих растений и талломах лишайников северотаежных лесов. Из минеральных элементов в листьях (хвое) древесных растениях ненарушенных сообществ преобладают калий и кальций. Листья березы характеризуются высоким содержанием Mg и Zn, хвоя ели и сосны — Al.

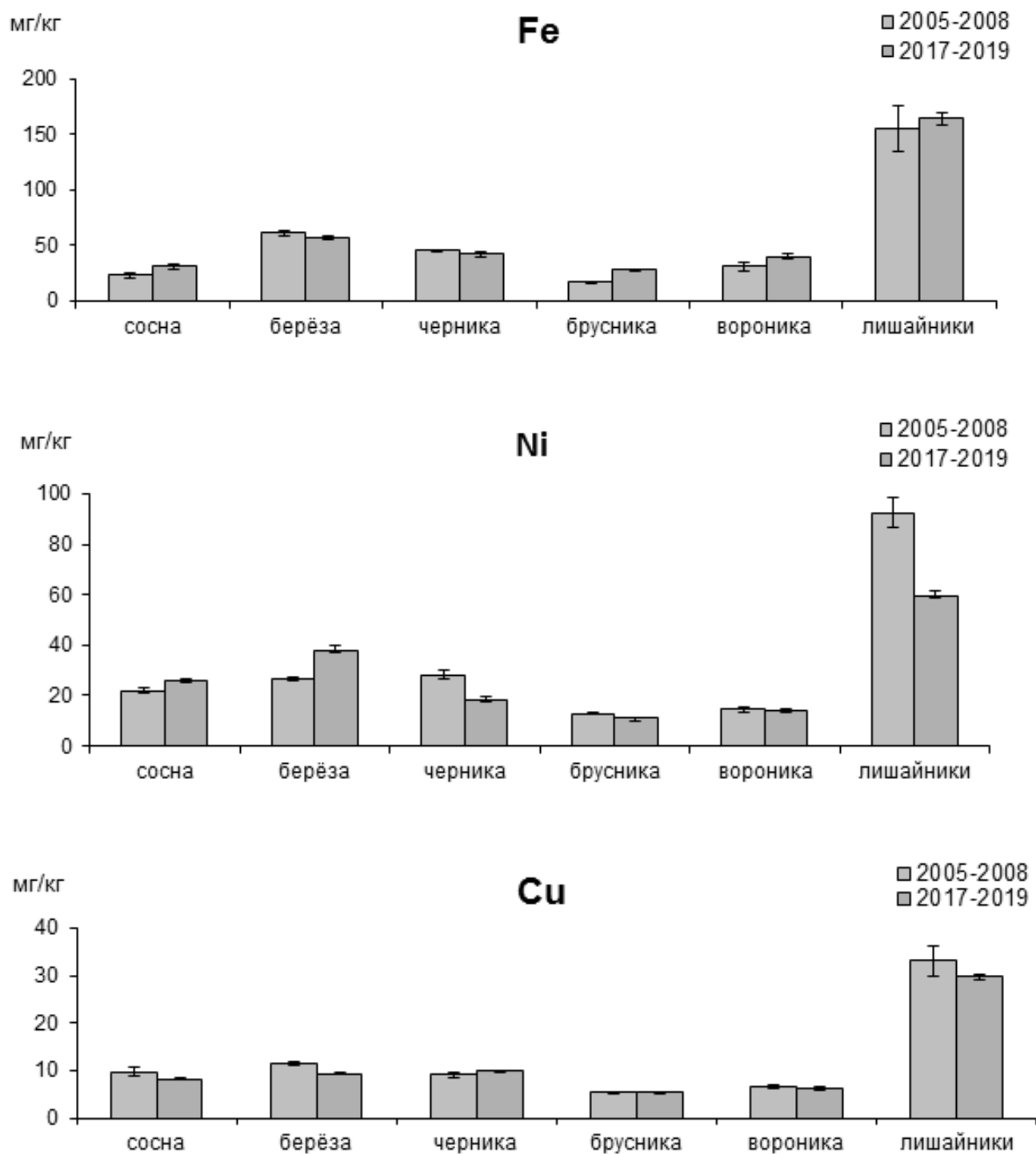


Рис. 3. Содержание Fe, Cu, Ni в листьях (хвое) растений и талломах лишайников на ППН М1К5 (Лапландский заповедник) в разные периоды исследований (2005–2008 и 2017–2019 гг.)

В листьях рассматриваемых кустарничков наблюдаются высокие концентрации Ca, K, Mg, P и Mn (табл. 3, 4). Самые высокие концентрации Ca обнаружены в листьях черники. Из зольных элементов в листьях вороники и брусники преобладает K, в листьях черники — Ca (еловые леса) и K (сосновые леса). Листья черники характеризуются также повышенной по сравнению с другими кустарничками аккумуляцией марганца и алюминия. Из минеральных элементов в зеленых мхах ненарушенных сообществ преобладает калий, кальций и фосфор. Химический состав лишайников характеризуется низким содержанием большинства химических элементов, за исключением железа, концентрация которого выше по сравнению с другими представителями биоты.

Среднее содержание тяжелых металлов в листьях (хвое) доминирующих растений и талломах лишайников в Лапландском заповеднике превышает региональный фон (табл. 7,8). Накопление ТМ в листьях растений связано с их активным корневым поглощением из-за увеличения концентраций доступных соединений этих элементов в почвах. Другим важным фактором является фоллиарное поглощение этих элементов. В лишайниках и зеленых мхах нами обнаружены самые высокие концентрации меди на ППН 8–93 и М1К5. Содержание Cu в зеленых мхах возрастает в 14.5 раза, лишайниках — в 27 раз по сравнению с фоном ($p < 0.05$). По уровню содержания Cu ряд имеет следующий вид: зеленые мхи > лишайники > хвоя сосны (однолетняя, многолетняя) > листья берёзы, черники > хвоя сосны (текущего года) > листья вороники > листья брусники > хвоя ели. На ППН 8–93 и М1К5 выявлено значительное накопление Ni ($p < 0.05$). во всех исследуемых растениях и лишайниках по сравнению с фоновыми значениями. По уровню содержания Ni в ассимилирующих органах в растительных образцах, отобранных на территории Лапландского заповедника, можно предложить следующий ряд: лишайники > хвоя сосны (многолетняя) >, хвоя ели (однолетняя, многолетняя) и сосны (однолетняя) > листья берёзы > хвоя ели, сосны (текущего года) > листья черники > листья вороники > листья брусники > зеленые мхи. На ППН М1К5 выявлено увеличение содержания Cd и Pb во всех исследуемых растительных образцах, Co — только в хвое ели и лишайниках ($p < 0.05$). На ППН 8–93 возрастание содержания Co по сравнению с фоном отмечено в хвое ели и листьях кустарничков, Cd — лишайниках, Pb — в хвое ели ($p < 0.05$).

В Лапландском заповеднике содержание Ca в зеленых мхах выше фоновых показателей. Ранее увеличение концентрации Ca на территории заповедника было выявлено в лишайнике *Cladonia stellaris* при одновременном снижении концентрации доступных форм соединений Ca в почве (Сухарева, 2016). Повышение содержания кальция в талломах лишайников и зеленых мхах, скорее всего, связано с атмосферным поглощением. Из-

вестно, что основными механизмами аккумуляции зелеными мхами минеральных элементов из окружающей среды являются поглощение элементов надземными органами с их поступлением путем обменной диффузии в симпласт клеток и поглощение минеральных элементов из субстрата с помощью ризоидов.

На рис. 2, 3 представлена динамика содержания ТМ в ассимилирующих органах растений и лишайников на территории заповедника в разные периоды исследования (2005–2008 гг. и 2017–2019 гг.)

Содержание меди и никеля в ассимилирующих органах хвойных деревьев сопоставимо по двум периодам исследования. В хвое ели отмечено снижение содержания Fe. В листьях берёзы сосновых и еловых лесов произошло снижение концентрации Cu. Напротив, концентрации Ni не изменились (ПП 8–93), а листья берёзы сосновых лесов (ПП М1К5) увеличились. В ассимилирующих органах брусники и вороники не обнаружено достоверных различий в содержании ТМ. В листьях черники в 2017–2018 гг. концентрации Ni снизились, Fe и Cu — остались на уровне 2005–2008 гг. ($p < 0.05$). За исследуемый период наиболее заметные изменения в содержании ТМ демонстрируют зеленые мхи. Так, концентрации Fe, Ni, Cu в 2017–2018 гг. снизились в 3.3; 5.2; 8.7 раза соответственно по сравнению с предыдущим периодом отбора образцов. В лишайниках отмечено достоверное снижение концентрации Ni ($p < 0.05$), значимых изменений в содержании Fe и Cu не выявлено.

Заключение

В результате регулярного мониторинга на стационарных пробных площадях Лапландского заповедника выявлены пространственные и временные закономерности функционирования северотаежных лесов на основе параметров минерального питания. Показано, что почвы, растения и лишайники в заповеднике загрязнены ТМ (Ni, Cu, Pb, Cd, Co). За исследуемый период 2007–2019 гг. выявлено увеличение содержания подвижных форм ТМ в дефолирующих сосновых лесах заповедника. Одновременно почвы обедняются элементами минерального питания (Ca, P, K, Mg, Mn), прежде всего, органогенный горизонт. Эти факторы оказывают негативное влияние на состояние растительного покрова этой территории. В лесных экосистемах заповедника выявлено значительное накопление Ni во всех исследуемых растениях и лишайниках по сравнению с фоновыми значениями.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН № 1021051803679–9 «Биоразнообразие и мультифункциональность наземных экосистем Евро-Арктического региона»

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробейчик Е.Л., Трубина М.Р., Хантемирова Е.В., Бергман И.Е. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2014. № 6. С. 448–458.
2. Исаева Л.Г., Костина Л.Г. Леса на территории заповедника // Труды Лапландского государственного природного биосферного заповедника. 2012. Вып. VI. М: Издательство «Перо», 2012. С. 69–111.
3. Переверзев В.Н. Зональные особенности альфагумусового почвообразования на моренных породах Кольского полуострова // Почвоведение. 2007. № 1. С 5–11.
4. Переверзев В.Н. Почвообразование в лесной зоне Кольского полуострова // Вест. КНЦ РАН. 2011. № 2. С. 74–82.
5. Классификация почв России. М.: Почв. ин-т им. Докучаева, 1997, 235 с.
6. 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 // Журнал общей биологии. 2016. Т. 77. № 2. С. 145–163.
7. Копчик Г.Н. Трансформация и устойчивость почв лесных экосистем под воздействием атмосферного загрязнения: Дис. . . докт. биол. наук / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, 2012. 410 с.
8. Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. — Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1998. — 316 с.
9. Лукина Н.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаёжных лесах / Отв. ред. А.С. Исаев. — М.: Наука, 2005. 245 с.
10. Лянгузова И.В. Толерантность компонентов лесных экосистем севера России к аэротехногенному загрязнению: Дисс. . . докт. биол. наук (спец 03.02.08). Спб.: Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, 2010. 367 с.
11. Лянгузова И.В. Тяжелые металлы в лесных почвах Кольского полуострова // Труды Кольского научного центра РАН. 2021. Том 12. С. 259–263.
12. Михайлова Т.А., Калугина О.В., Шергина О.В. Мониторинг техногенного загрязнения состояния сосновых лесов на примере Иркутской области // Лесоведение. 2020. № 3. С. 265–273.
13. Сухарева Т.А. Элементный состав талломов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 4. С. 70–82.
14. Сухарева Т.А., Ершов В.В., Исаева Л.Г., Шкондин М.А. Оценка состояния северотаежных лесов в условиях снижения промышленных выбросов комбинатом «Североникель» // Цветные металлы. 2020. № 8. С. 33–41.
15. Ershov V.V., Lukina N.V., Danilova M.A., Isaeva L.G., Sukhareva T.A. and Smirnov V.E. Assessment of the Composition of Rain Deposition in Coniferous Forests at the Northern Tree Line Subject to Air Pollution // Russian Journal of Ecology. — 2020. — Vol. 51 — No. 4. — P. 319–328.
16. Salemaa M., Derome J., Helmisaari H.-S., Nieminen T., Vanha-Majamaa I. Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland // Science of the Total Environment. 2004. V. 324. Iss. 1–3. P. 141–160.
17. Zakrzewska M. Klimek B. Trace element concentration in tree leaves and lichen collected along a metal pollution gradient near Olkusz (Southern Poland) // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2018. V. 100. P. 245–249.

© Сухарева Татьяна Алексеевна (s.stat.a@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»