

Научная статья
УДК 630*17:582.475 (470.21)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.008

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЛАПЛАНДСКОГО ЗАПОВЕДНИКА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

**Татьяна Алексеевна Сухарева¹, Вячеслав Вячеславович Ершов²,
Екатерина Александровна Иванова³, Ирина Михайловна Штабровская⁴,
Николай Леонидович Алфертьев⁵, Дмитрий Андреевич Живов⁶, Николай Сергеевич Рябов⁷**

^{1–4,6,7}Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

⁵Лапландский государственный природный биосферный заповедник, Мончегорск, Россия

¹t.sukhareva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>

²v.ershov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0455-724X>

³ea.ivanova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9528-6619>

⁴i.shtabrovskaya@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7723-2227>

⁵alfertev@laplandzap.ru

⁶d.zhivov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4670-0144>

⁷n.ryabov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4611-9207>

Аннотация

Представлены данные многолетнего биогеохимического мониторинга (2015–2023 гг.) сосновых лесов на территории Лапландского государственного биосферного заповедника, находящего в зоне влияния атмосферных выбросов медно-никелевого производства. Установлено, что среднегодовая температура органогенного горизонта почвы варьирует от +2,7 до +4,1 °С, в тёплые годы подстилка прогревается до +17,5...+22,0 °С. Аэротехногенное загрязнение существенно повлияло на состав снеговых и дождевых вод, почвы, древесного опада. Превышение концентраций Cu и Ni в осадках и опаде по сравнению с фоном достигало 20 раз, в почве — 200 раз. Наблюдалось повышение содержания S и SO₄²⁻ в осадках и опаде в 3 раза по сравнению с фоном, а также снижение содержания Ca и Mg в почве и древесном опаде.

Ключевые слова:

сосновые леса, температура, атмосферные осадки, почвы, древесный опад, химический состав, Лапландский заповедник, Мурманская область

Финансирование:

работа выполнена в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН «Структурно-функциональная организация и динамика наземных экосистем Евро-Арктического региона» № 1023032200043-6 при содействии сотрудников Лапландского заповедника.

Для цитирования:

Биогеохимический мониторинг сосновых лесов на территории Лапландского заповедника (Мурманская область) / Т. А. Сухарева [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025. Т. 4, № 3. С. 127–144. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.008.

Original article

BIOGEOCHEMICAL MONITORING OF PINE FORESTS IN THE LAPLAND STATE NATURE RESERVE (MURMANSK REGION)

**Tatyana A. Sukhareva¹, Vyacheslav V. Ershov², Ekaterina A. Ivanova³, Irina M. Shtabrovskaya⁴,
Nikolay L. Alfertev⁵, Dmitriy A. Zhivov⁶, Nikolay S. Ryabov⁷**

^{1–4,6,7}Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia

⁵Lapland State Nature Biosphere Reserve, Monchegorsk, Russia

¹t.sukhareva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>

²v.ershov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0455-724X>

³ea.ivanova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9528-6619>

⁴i.shtabrovskaya@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7723-2227>

⁵alfertev@laplandzap.ru

⁶d.zhivov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4670-0144>

⁷n.ryabov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4611-9207>

Abstract

The paper presents data from long-term biogeochemical monitoring (2015–2023) of pine forests in the Lapland State Nature Biosphere Reserve influenced by atmospheric emissions from copper-nickel smelter. It was found that

the mean annual temperature of the organic soil horizon ranged from +2.7 to +4.1 °C, while in warmer years, the litter layer warmed up to +17.5...+22.0 °C. Air pollution significantly has affected the composition of snowmelt and rainwater, soil and needle litterfall. The concentrations of Cu and Ni in precipitation and needle litterfall have exceeded background levels by up to 20 times, in soil — by up to 200 times. An increase in S and SO₄²⁻ content in precipitation and litter (3-fold compared to background levels) as well as a decrease in Ca and Mg content in soil and needle litterfall were observed.

Keywords:

pine forests, temperature, atmospheric precipitation, soils, litterfall, chemical composition, Lapland Reserve, Murmansk region

Funding:

This study was supported within the framework of the state assignment of the INEP KSC RAS "Structural and functional organization and dynamics of terrestrial ecosystems of the Euro-Arctic region" № 1023032200043-6 with the assistance of the Lapland Reserve staff.

For citation:

Biogeochemical monitoring of pine forests in the Lapland state nature reserve (Murmansk region / T. A. Sukhareva [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025. Vol. 4, no. 3. P. 127–144. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.008.

Введение

В современный период на функционирование лесных экосистем большое влияние оказывает техногенное воздействие со стороны промышленных предприятий [1–6]. В условиях воздушного загрязнения леса выступают как трансформатор техногенных потоков. Атмосферные выпадения в виде снега и дождя играют важную роль в циклах элементов и функционировании лесных экосистем. Химический состав атмосферных выпадений значительно изменяется после контакта с пологом леса, что приводит к изменению кислотности вод и концентраций элементов, содержащихся в них [1]. В межкروновых пространствах лесов на северном пределе распространения атмосферные выпадения имеют преимущественно атропогенный характер, то есть состав выпадений определяют атмосферные осадки, в подкروновых пространствах — преимущественно аутогенный (биогенный) характер [7]. Накопление тяжёлых металлов (Cu, Ni) в лесных почвах вблизи металлургических предприятий приводит к дефициту основных катионов (обменных Ca, Mg, K) в органическом горизонте [8]. Как для живых частей растений, так и для отмирающих техногенное загрязнение происходит за счёт непосредственного оседания частиц металлов на поверхности хвои/листьев, а также путём поглощения корнями живых растений [9–13]. Опад древесных растений (отмирающие листья, хвоя и т. д.) является источником органического вещества почв и выступает в роли связующего звена между растениями лесного полога и почвой. За счёт особенностей химического состава древесный опад способствует формированию фитогенных зон влияния деревьев, подавляет/ускоряет рост растений, регулирует состав почв [14–16]. Аэротехногенное загрязнение воздействует на опадающие части растений в целом больше времени, чем на живые, что приводит к значительному поступлению тяжёлых металлов с отмирающим материалом в почву.

Лапландский заповедник был создан в 1930 г. для сохранения популяции дикого северного оленя, испытывавшей сильный антропогенный прессинг из-за бесконтрольной охоты [17]. Это была одна из ключевых целей его создания. Кроме того, перед ним ставилась цель сохранить и изучить типичные экосистемы Мурманской области, которые в то время оставались практически ненарушенными. Одновременно с созданием заповедника начал функционировать медно-никелевый комбинат «Североникель» (г. Мончегорск), изначально занимавшийся добычей и переработкой местных медно-никелевых руд. С годами объёмы производства возрастали, а вместе с ними усиливалось антропогенное воздействие на экосистемы заповедника за счёт выбросов SO₂ и тяжёлых металлов комбинатом, первые признаки деградации лесов отмечались уже в 1940-х гг. [18].

Ситуация резко изменилась, когда на комбинате начали переработку норильских руд, в которых содержание серы было значительно выше, чем в местных. К 1980-м гг. экосистемы заповедника оказались сильно угнетены. Это выражалось в усыхании целых массивов древостоев, а также в накоплении тяжёлых металлов как в почвах [19, 20], так и в биотических компонентах (деревьях, кустарниках, грибах, ягодах и др.) [21–23]. За последние двадцать лет выбросы комбината существенно сократились и экосистемы вступили в фазу постепенного восстановления, но за долгие годы

в окружающей среде накопилось огромное количество тяжёлых металлов, которые ещё долго будут влиять на экосистемы Лапландского заповедника и прилегающие к комбинату территории [18].

Анализ результатов многочисленных исследований показывает большой интерес авторов к изменению состава и свойств атмосферных выпадений, почвы, растений под воздействием природных и антропогенных факторов [24–27]. Следствием техногенного загрязнения является трансформация химического состава атмосферных выпадений и почвенно-растительного покрова лесных экосистем [2, 28–30], наблюдаются чёткие признаки сокращения плодородия почвы и повышения её кислотности, что сказывается на видовом составе наземной растительности [31, 32]. Химический состав различных компонентов лесных экосистем на стационарах долговременного мониторинга может использоваться как показатель трансформации и адаптации лесных экосистем в условиях действия природных и антропогенных факторов.

Цель работы — оценка состояния различных компонентов сосновых лесов на территории Лапландского заповедника, находящегося в зоне воздействия атмосферных выбросов комбината «Североникель», на основе анализа многолетних данных эколого-биогеохимического мониторинга атмосферных выпадений, почвы, древесного опада, температурного режима воздуха и почвы.

Материалы и методы

Исследование температурного режима воздуха и почвы, химического состава снеговых и дождевых вод, почв, древесного опада проводились в 2015–2023 гг. на мониторинговых площадях постоянного наблюдения Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН) в сосновых лесах в Лапландском заповеднике (на расстоянии 31 км от комбината «Североникель») и на фоновых территориях, на юго-западе Мурманской области, окрестностях с. Алакуртти (150 км от комбината) (рис. 1).

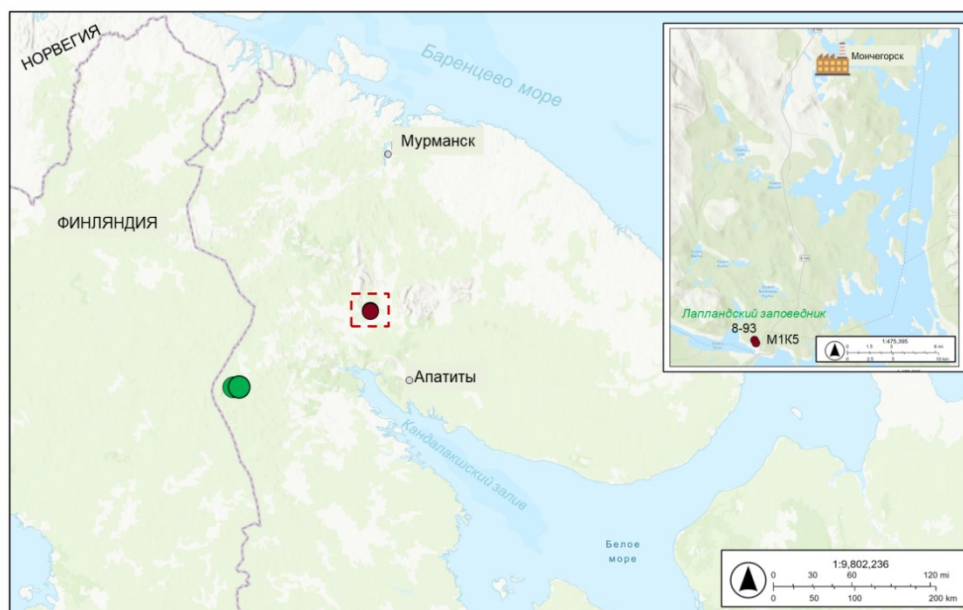


Рис. 1. Схема расположения площадок постоянного наблюдения на территории Лапландского заповедника и на фоновых территориях в окрестностях с. Алакуртти (Кандалакшский район Мурманской области)

Fig. 1. Map of permanent observation sites on the territory of the Lapland State Nature Reserve and in background areas in the vicinity of the Alakurtti Settlement (Kandalaksha district of the Murmansk region)

Фоновая территория отражает региональный фон района исследований и соответствует всем критериям для контрольных площадок, рекомендуемым международными программами [33]. Древесный ярус представлен сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и берёзой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), единично встречается ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.). В напочвенном покрове

доминируют черника (*Vaccinium myrtillus* L.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), вороника (*Empetrum hermaphroditum* Hager.) и лишайники родов *Cladonia* и *Cetraria* (табл. 1). Почвы представлены иллювиально-железистыми подзолами (Rustic Podzols) [34] на моренных отложениях с типичным для них профилем: О-Е-Bhf-С. Подзолы северотаёжных лесов Мурманской области имеют малую мощность органогенного горизонта и небольшие запасы органического вещества, низкое содержание азота и гумуса в минеральных горизонтах, кислую реакцию почвенного раствора [35, 36].

Пробные площади оборудованы осадкоприёмниками и опадоуловителями (рис. 2).

По информации АО «Кольская ГМК», предоставленной ИППЭС КНЦ РАН, за период с 1991 по 2022 гг. выбросы диоксида серы комбинатом «Североникель» снизились с 196 до 13 тыс. т/год, никеля — с 2660 до 8 т/год; меди — с 1739 до 61 т/год (рис. 3).

Таблица 1

Характеристика пробных площадей
Characteristics of the monitoring plots

Месторасположение пробных площадей		Лапландский заповедник		Фоновые территории	
Размер, га		0,25		0,25	
Координаты		N67.63690; E32.70315		N66.95165; E29.60648	
Тип сообщества		Сосняк лишайниково-кустарничковый		Сосняк кустарничково-лишайниковый	
Древесная порода		Сосна	Берёза	Сосна	Берёза
Характеристики живых деревьев	Диаметр, см	12,3±0,4	8,2±0,5	19,4±0,7	10,9±1,1
	Высота, м	10,2±0,2	6,9±0,5	14,6±0,3	9,6±0,9
Количество, шт/га	Живых	4400		2250	
	Усохших	175		475	
	Всего	4575		2725	
Возраст основной породы (<i>Pinus sylvestris</i> L.), лет		100–120		160–180	
Состав древостоя		10С+Б		9С1Б ед. Е	
Мощность органогенного горизонта (О), см		9,8±1,0		5,9±0,5	

Примечание. В ячейках, выделенных серым цветом, указаны средние значения ± стандартная ошибка.



Осадкоприёмники



Опадоуловители

Рис. 2. Оборудование на площадках постоянного наблюдения

Fig. 2. Equipment on permanent monitoring plots

Температуру приземного слоя воздуха и температуру органогенного горизонта почвы (горизонт О) в под- и межкروновых пространствах (на глубине 5 см) измеряли сертифицированными программируемыми термохронами DS1921G-F5 (Госреестр средств измерений) с автономным режимом работы (до 2048 показаний) и предельным диапазоном измерений от -40 до $+80$ °C [37]. Запуск термохронов для снятия показаний (с периодичностью 2–4 часа) проводили на месте полевых работ при помощи портативного устройства «Термохрон-аудитор». Термодатчики были установлены в июне 2015 г., поэтому температурные данные в статье представлены с 2016 г.

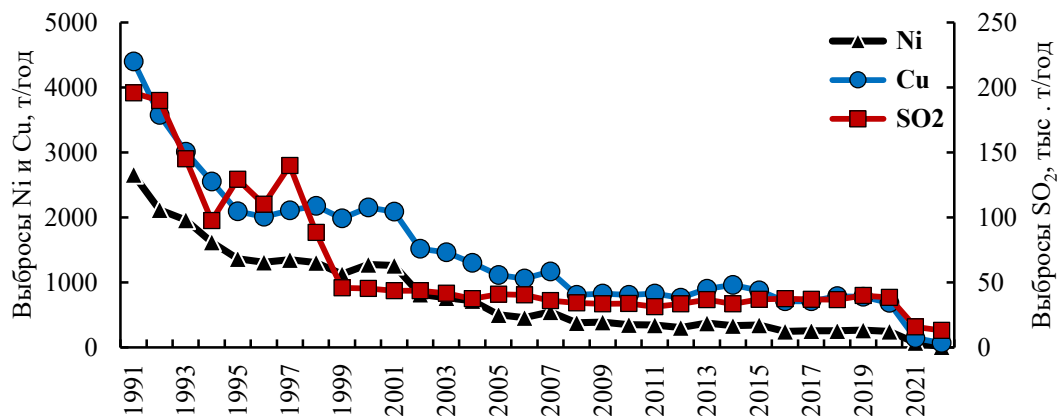


Рис. 3. Выбросы в атмосферу SO₂, Ni, Cu комбинатом «Североникель» по данным АО «Кольская ГМК» за период 1991–2022 гг.
Fig. 3. Emissions of SO₂, Ni, Cu into the atmosphere by the Severonikel smelter according for the period 1991–2022

На основе первичных измерений термохронов с периодичностью 2–4 часа в сутки рассчитывали среднесуточные температуры, по усреднённым среднесуточным вычисляли среднемесячные значения. Определяли максимальные и минимальные среднесуточные (абсолютные максимумы и минимумы), среднегодовые показатели температуры, суммы эффективных, активных, положительных и отрицательных температур.

Снег отбирали в конце марта — начале апреля в трёхкратной повторности в под-, межкروновых и открытых пространствах. Отбор снегового керна проводили из ненарушенной стенки траншеи с помощью пластикового коллектора диаметром 11 см. Осадкоприёмники дождевых вод представляли собой пластиковые трубы с воронкой диаметром 16 см, которые были установлены на пробной площади по схеме: 5 шт. — под кроной, 5 шт. — между крон и 4 шт. — на открытом пространстве. Пробы дождевых вод собирали в период с мая по октябрь ежемесячно.

Органогенный горизонт почвы (OFH) отбирали в основных элементах растительной мозаики — в подкروновых (под кроной *Pinus sylvestris* L.) и межкروновых (под лишайниками и кустарничками) пространствах. Количество отобранных почвенных проб на пробной площади составляло от 3 до 6, мощность органогенного горизонта варьировала от 6 до 14 см. В лаборатории образцы разбирали, высушивали при комнатной температуре, а затем просеивали. Аналитической обработке подвергали мелкозём (фракция менее 1,0 мм).

Сбор опада на площадках проводили в соответствии с рекомендациями международной программы ICP-Forests [33, 38]. Опадоуловители на пробных площадях были расположены в меж- (7–8 шт.) и подкروновых (4–5 шт.) пространствах. Опад круглогодично собирался в хлопковые мешки, закреплённые к нижней части воронки опадоуловителя. Диаметр верхней части воронок — 82 см, глубина — 90 см. Коллекторы устанавливали над землёй на высоте 1–1,3 м для отвода из них воды. Отбор образцов из опадоуловителей проводили дважды в год: в начале октября и начале июня. В лабораторных условиях опад разбирали на фракции (хвоя, кора, ветки, шишки, микростробилы и др.) и взвешивали. В работе представлены данные по опад хвой сосны (*Pinus sylvestris* L.). Расчёт массы опада хвой сосны проводили с учётом проективного покрытия крон деревьев на пробной площади.

Химико-аналитические работы были выполнены в Центре коллективного пользования физико-химических методов анализа ИППЭС КНЦ РАН. Кислотность ($\text{pH}_{\text{водн}}$) снеговых и дождевых вод, почвы определяли потенциометрически, анионы минеральных кислот (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) — методом ионообменной хроматографии, NH_4^+ , P — колориметрически, металлы (Ca, Mg, K, Na, Cu, Ni) в пробах — методами атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Актуальную кислотность (pH) в органогенном горизонте почвы измеряли в водной суспензии, используя соотношение почвы и вытеснителя как 1:25. Для определения содержания доступных соединений элементов питания образцы почвы обрабатывали 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ($\text{pH} = 4,65$). Для почвенных проб использовали те же соотношения почвы и вытеснителя, что и при определении pH. В почве и древесном опаде N определяли методом Кьельдаля, P — колориметрически, S — турбидиметрическим методом. Перед проведением химического анализа пробы древесного опада измельчали и подвергали мокрому озолению концентрированной азотной кислотой.

Сравнение средних значений температурных показателей между разными сезонами проводили с использованием t -критерия Стьюдента. Для меж- и внутрибиогеоценотического сравнения концентраций элементов в снеге, дожде и почве использовали U -критерий Манна — Уитни. Оценка вариабельности и различий массы и химического состава опада хвои проводилась с применением программного обеспечения MS Excel через оценку средних значений и стандартной ошибки методами описательной статистики.

Результаты и обсуждение

Годовая динамика температуры атмосферного воздуха и почвы на территории Лапландского заповедника. Среднегодовая температура атмосферного воздуха была положительной и варьировала от $+0,2$ до $+2,5$ °C. Различия среднегодовых значений между годами были достоверны ($T_{st} \geq 2,10$ при $p < 0,05$). Среднегодовые температуры в под- и межкروновых пространствах во все исследованные годы были положительными и в 2017 и 2019 гг. поддерживались на сходном уровне ($+2,7 \pm 0,3$ и $+3,1 \pm 0,3$ °C), а в 2016, 2018, 2020–2023 гг. варьировали в диапазоне от $+3,7 \pm 0,3$ до $+4,6 \pm 0,3$ °C и были достоверно выше (на $1,2$ – $1,4$ °C), чем в холодные 2017 и 2019 гг. (рис. 4).

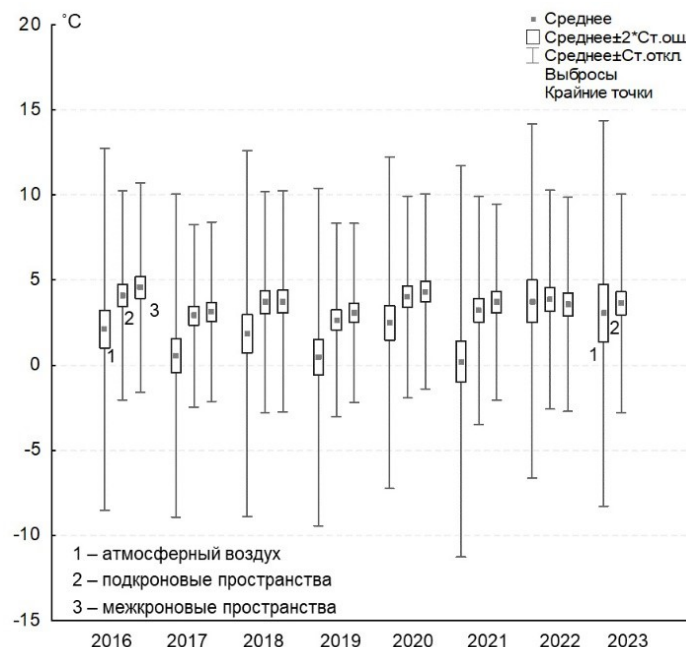


Рис. 4. Среднегодовые значения и пределы варьирования температуры воздуха и органогенного горизонта почвы под- и межкروновых пространств в Лапландском заповеднике
Fig. 4. Annual average values and limits of variation of air temperature and the organogenic horizon of the soil of the sub- and inter-crown spaces in the Lapland Nature Reserve

Годовая сумма температуры органогенного горизонта почвы в под- и межкروновых пространствах в холодные годы (2017 и 2019) была наименьшей и не превышала +1148 °С, а в тёплые годы оказалась на +440...+531 °С выше за счёт большей суммы активных температур. Максимальные годовые температуры под кроной и между крон деревьев регистрировали в конце июля (+23,0...+25,7 °С). В холодные 2017 и 2019 гг. лесная подстилка прогрелась до сходных максимальных температур (+16,3...+16,7 и +16,0...+17,0 °С), а в тёплые годы — до абсолютных максимальных температур (17,5–22,0 °С) (табл. 2).

Таблица 2

Годовые показатели температуры (T , °С) органогенного горизонта почвы соснового леса
на территории Лапландского заповедника
Annual temperature indices (T , °С) of the organogenic soil horizons of the pine forest
in the territory of the Lapland State Nature Reserve

Показатель	Атмосферный воздух							
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Средняя T , °С	+2,1±0,6	+0,6±0,5	+1,9±0,6	+0,5±0,5	+2,5±0,5	+0,2±0,6	+3,8±0,6	–
max	+24,3	+19,6	+25,2	+21,2	+22,7	+24,1	+24,0	–
min	–34,2	–29,3	–21,6	–27,4	–30,1	–28,3	–24,3	–
Амплитуда	58,5	48,9	46,8	48,6	52,8	52,4	48,3	–
Подкروновые пространства								
Средняя T , °С	+4,1±0,3	+2,9±0,3	+3,7±0,3	+2,7±0,3	+4,0±0,3	+3,2±0,4	+3,9±0,3	+3,6±0,3
max	+18,1	+16,7	+20,1	+16,3	+17,5	+22,0	+16,7	+17,2
min	–4,5	–5,5	–4,4	–6,4	–6,1	–6,9	–4,5	–5,3
Амплитуда	22,6	22,2	24,6	22,7	23,5	28,9	21,2	22,5
Число дней в году с температурами выше/ниже пороговых значений								
$T < 0$ °С	109	168	144	163	95	154	149	162
$T \geq 0$ °С	257	197	221	202	271	211	216	203
$0 \leq T < +5$ °С	124	82	89	84	137	67	74	66
$+5 \leq T < +10$ °С	57	60	45	60	38	56	64	42
$T \geq +10$ °С	76	55	87	58	96	88	78	95
Годовая сумма пороговых температур								
$T < 0$ °С	–149	–192	–267	–341	–95	–436	–265	–295
$T \geq 0$ °С	1651	1254	1619	1312	1564	1615	1676	1622
$0 \leq T < +5$ °С	129	94	97	122	38	75	78	69
$+5 \leq T < +10$ °С	436	443	331	497	300	393	506	315
$T \geq +10$ °С	1085	718	1192	693	1227	1147	1092	1238
Межкروновые пространства								
Средняя T , °С	+4,6±0,3	+3,1±0,3	+3,7±0,3	+3,1±0,3	+4,3±0,3	+3,7±0,3	+3,6±0,3	–
max	+18,5	+17,0	+20,1	15,9	+18,1	+17,5	16,6	–
min	–3,2	–5,4	–4,3	–3,9	–0,8	–3,6	–5,3	–
Амплитуда	21,7	22,4	24,5	19,8	18,9	21,1	21,9	–
Число дней в году с температурами выше/ниже пороговых значений								
$T < 0$ °С	146	159	148	130	39	122	155	–
$T \geq 0$ °С	220	206	217	235	327	242	210	–
$0 \leq T < +5$ °С	71	88	85	114	189	108	80	–
$+5 \leq T < +10$ °С	69	61	46	62	43	54	42	–
$T \geq +10$ °С	80	57	86	59	95	80	88	–

Окончание таблицы 2

Показатель	Атмосферный воздух							
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Годовая сумма пороговых температур								
$T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	-96	-118	-261	-195	-6	-164	-238	—
$T \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	1170	1266	1625	1318	1593	1514	1542	—
$0 \leq T < +5\text{ }^{\circ}\text{C}$	88	79	99	107	39	100	43	—
$+5 \leq T < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$	536	440	343	510	324	379	337	—
$T \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$	1145	747	1184	701	1229	1035	1161	—

Примечания. 1. Синим цветом выделены минимальные по годам значения, красным — максимальные.

2. В ячейках серого цвета приведены достоверные различия среднегодовых температур при $Tst \geq 2,80$, $p < 0,05$.

Сравнение круглогодичных температурных рядов в лесном подзоле за восемь лет (2016–2023), два года (2017 и 2019) из которых были достоверно более холодными ($Tst \geq 2,80$ при $p < 0,05$), по показателям лесной подстилки: среднегодовые температуры, максимальные температуры, число дней с отрицательными и активными температурами — выявило значительную вариабельность в сроках пяти основных температурных переходов годового цикла: осеннего снижения $T < +5\text{ }^{\circ}\text{C}$, зимнего перехода на устойчивые $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, весеннего оттаивания подстилки ($T \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), её прогрева до эффективных температур ($+5 \leq T < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$) и наибольшего прогрева до активных температур ($T \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 5).

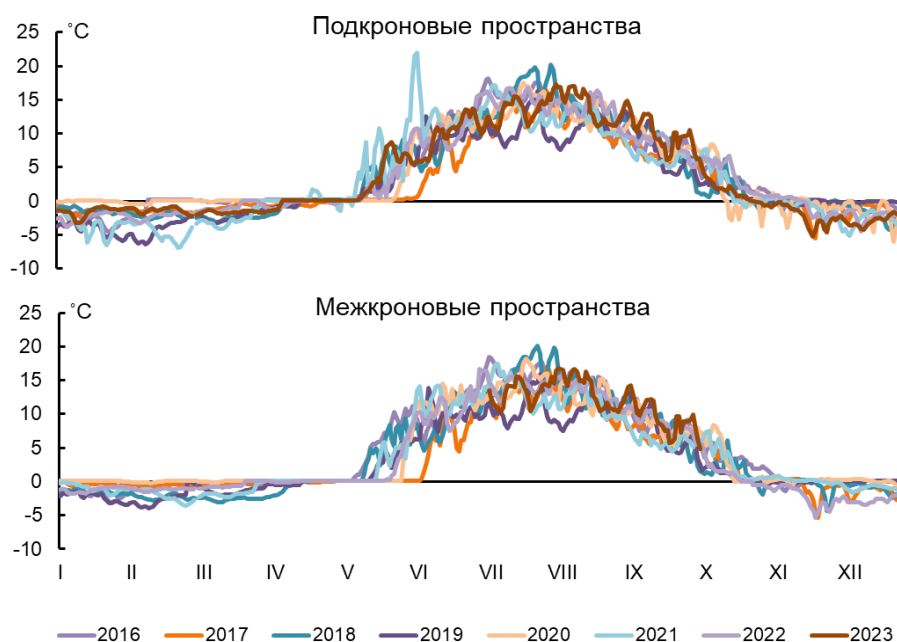


Рис. 5. Динамика среднесуточной температуры органогенного горизонта почвы (подстилки) под- и межкروновых пространств в Лапландском заповеднике

Fig. 5. Dynamics of the average daily temperature of the organogenic soil horizon (litter) of under-crown and inter-crown spaces in the Lapland State Nature Reserve

Осеннее остывание подстилки ниже $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в холодные годы (2017 и 2019) отмечалось с третьей декады сентября по первую декаду октября, в тёплые — на 8–16 дней позже.

Зимний период характеризовался либо слабоотрицательными температурами подстилки, либо её промерзанием до абсолютных минимумов $-6,9...-3,2^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 2). Переход на устойчивые отрицательные температуры на глубине 5 см отмечался с середины октября до конца ноября (16 октября — 26 ноября). Число дней с отрицательными температурами варьировало в холодные годы от 163 до 168 в подкроновых и от 146 до 159 в межкroновых пространствах, то есть составляло от 4,8 до 5,6 месяцев в году (см. табл. 2).

Дни с абсолютными минимальными температурами приходились на самый холодный месяц — январь (20–21 января), когда температура атмосферного воздуха опускалась до $-34,2^{\circ}\text{C}$ и подстилка в подкroновых пространствах промерзала сильнее, чем в межкroновых ($-1,3...-5,9^{\circ}\text{C}$ против $-0,3...-4,7^{\circ}\text{C}$) (см. табл. 2), что можно объяснить различиями в мощности снегового покрова как теплоизолятора, защищающего почву от влияния низких температур воздуха. Значимыми факторами промерзания почвенных горизонтов являются мощность снегового покрова и время его устойчивого формирования в осенний период. Лесной полог влияет на становление снегового покрова, задерживая часть выпадающего снега на ветвях хвойных древостоев [39].

В целом различия между тёплыми и холодными годами проявлялись в температурном режиме лесной подстилки в разные сезоны: холодные годы отличались её более ранним осенним остыванием, наличием зимнего промерзания, поздним весенним оттаиванием, большим числом дней с отрицательными температурами и меньшим числом дней и сумм положительных и активных температур, а также максимальных температур.

Кислотность и концентрации элементов в снеговых водах. На фоновой территории из катионов преобладали Ca и Na, среди анионов — SO_4^{2-} . Концентрации тяжёлых металлов не превышали 0,002–0,003 мг/л. Концентрации Ca, Mg, K, Na, P и SO_4^{2-} достоверно ($p < 0,05$) выше в подкroновых пространствах по сравнению с межкroновыми и открытыми пространствами (табл. 3). На территории Лапландского заповедника концентрации всех элементов, за исключением NO_3^- , в снеговых водах достоверно выше под кронами древесных растений, по сравнению с межкroновыми пространствами и открытой территорией. Это связано со смывом и выщелачиванием этих элементов из растительных тканей деревьев, что может быть обусловлено частыми оттепелями на Кольском полуострове в зимний период.

Таблица 3

Концентрации элементов и показатель pH в снеговых водах в сосновых лесах за 2015–2023 гг., мг/л
Concentrations of elements and pH in snow waters in pine forests for the period 2015–2023, mg/l

Пробная площадь	V, мл	pH	Ca	Mg	K	Na	NH_4^+	Ni	Cu	P	SO_4^{2-}	NO_3^-
Под кронами												
Фон	<u>1232</u> 107	<u>5,52</u> 0,05	<u>0,42</u> 0,02	<u>0,09</u> 0,01	<u>0,13</u> 0,02	<u>0,32</u> 0,02	<u>0,09</u> 0,01	<u>0,003</u> 0,001	<u>0,003</u> 0,001	<u>0,014</u> 0,001	<u>0,79</u> 0,06	<u>0,49</u> 0,05
Лапландский заповедник	<u>1290</u> 86	<u>4,88</u> 0,07	<u>0,70</u> 0,06	<u>0,18</u> 0,01	<u>0,17</u> 0,02	<u>0,62</u> 0,06	<u>0,21</u> 0,04	<u>0,012</u> 0,001	<u>0,004</u> 0,001	<u>0,04</u> 0,02	<u>1,83</u> 0,14	<u>0,70</u> 0,08
Между кронами												
Фон	<u>1802</u> 92	<u>5,68</u> 0,06	<u>0,36</u> 0,03	<u>0,07</u> 0,01	<u>0,06</u> 0,02	<u>0,50</u> 0,26	<u>0,08</u> 0,01	<u>0,002</u> 0,001	<u>0,002</u> 0,001	<u>0,011</u> 0,001	<u>0,60</u> 0,06	<u>0,56</u> 0,05
Лапландский заповедник	<u>2082</u> 139	<u>5,35</u> 0,08	<u>0,39</u> 0,03	<u>0,09</u> 0,01	<u>0,05</u> 0,00	<u>0,45</u> 0,11	<u>0,10</u> 0,02	<u>0,007</u> 0,001	<u>0,002</u> 0,0001	<u>0,010</u> 0,001	<u>0,83</u> 0,08	<u>0,67</u> 0,05
Открытая территория												
Фон	<u>2032</u> 85	<u>5,78</u> 0,06	<u>0,36</u> 0,03	<u>0,07</u> 0,01	<u>0,05</u> 0,01	<u>0,27</u> 0,07	<u>0,07</u> 0,02	<u>0,003</u> 0,001	<u>0,001</u> 0,0001	<u>0,007</u> 0,001	<u>0,51</u> 0,05	<u>0,47</u> 0,05
Лапландский заповедник	<u>1695</u> 96	<u>5,48</u> 0,06	<u>0,34</u> 0,03	<u>0,08</u> 0,01	<u>0,04</u> 0,001	<u>0,34</u> 0,02	<u>0,07</u> 0,02	<u>0,005</u> 0,002	<u>0,001</u> 0,0001	<u>0,010</u> 0,001	<u>0,63</u> 0,05	<u>0,64</u> 0,05

Примечание. В числителе указано среднее значение, в знаменателе — стандартная ошибка.

На территории Лапландского заповедника под и между кронами деревьев по сравнению с фоном наблюдается достоверное увеличение концентраций Ni (до 4 раз) и SO_4^{2-} (до 2 раз). Актуальная кислотность в снеговых водах на территории Лапландского заповедника, по сравнению с фоном, достоверно выше. Увеличение концентраций соединений элементов, входящих в состав выбросов, а также кислотности вод объясняется приближением к источнику воздушного промышленного загрязнения.

Кислотность и концентрации элементов в дождевых водах. На фоновой территории в составе выпадений в виде дождя из катионов в водах преобладали Ca и NH_4^+ , среди анионов — SO_4^{2-} . Концентрация всех элементов в подкروновых водах была достоверно выше ($p < 0,05$), чем в межкروновых и открытых пространствах, за исключением NO_3^- . Это свидетельствует о смыве и выщелачивании соединений элементов из растительных тканей. В дождевых водах Лапландского заповедника наблюдается аналогичные внутри- и межбиогеоценоотические различия. Также следует отметить, что показатель pH в водах межкроновых пространств и на открытых территориях выше, чем под кронами, как в фоновых условиях, так и в Лапландском заповеднике (табл. 4).

Таблица 4

Концентрации элементов и показатель pH в дождевых водах в сосновых лесах за 2015–2023 гг., мг/л
Concentrations of elements and pH in rainwater in pine forests for the period 2015–2023, mg/l

Пробная площадь	V, мл	pH	Ca	Mg	K	Na	NH_4^+	Ni	Cu	P	SO_4^{2-}	NO_3^-
Под кронами												
Фон	$\frac{664}{71}$	$\frac{4,96}{0,07}$	$\frac{2,91}{0,23}$	$\frac{0,74}{0,05}$	$\frac{2,68}{0,23}$	$\frac{1,31}{0,15}$	$\frac{2,83}{0,33}$	$\frac{0,01}{0,00}$	$\frac{0,01}{0,00}$	$\frac{0,17}{0,03}$	$\frac{2,63}{0,27}$	$\frac{0,29}{0,07}$
Лапландский заповедник	$\frac{696}{122}$	$\frac{3,90}{0,05}$	$\frac{4,53}{0,31}$	$\frac{0,99}{0,06}$	$\frac{2,26}{0,19}$	$\frac{1,92}{0,25}$	$\frac{3,68}{0,38}$	$\frac{0,09}{0,01}$	$\frac{0,05}{0,01}$	$\frac{0,25}{0,05}$	$\frac{14,53}{0,95}$	$\frac{0,61}{0,13}$
Между кронами												
Фон	$\frac{1034}{79}$	$\frac{5,96}{0,07}$	$\frac{0,81}{0,10}$	$\frac{0,18}{0,01}$	$\frac{0,21}{0,02}$	$\frac{0,29}{0,02}$	$\frac{0,32}{0,05}$	$\frac{0,004}{0,001}$	$\frac{0,005}{0,001}$	$\frac{0,04}{0,01}$	$\frac{1,15}{0,16}$	$\frac{0,32}{0,04}$
Лапландский заповедник	$\frac{994}{83}$	$\frac{5,31}{0,08}$	$\frac{1,10}{0,09}$	$\frac{0,23}{0,02}$	$\frac{0,29}{0,06}$	$\frac{0,37}{0,05}$	$\frac{0,49}{0,09}$	$\frac{0,010}{0,001}$	$\frac{0,005}{0,001}$	$\frac{0,06}{0,02}$	$\frac{2,77}{0,24}$	$\frac{0,42}{0,06}$
Открытая территория												
Фон	$\frac{1078}{87}$	$\frac{6,08}{0,07}$	$\frac{1,01}{0,13}$	$\frac{0,17}{0,01}$	$\frac{0,12}{0,01}$	$\frac{0,28}{0,02}$	$\frac{0,17}{0,03}$	$\frac{0,003}{0,001}$	$\frac{0,005}{0,001}$	$\frac{0,02}{0,00}$	$\frac{1,34}{0,29}$	$\frac{0,45}{0,04}$
Лапландский заповедник	$\frac{959}{86}$	$\frac{5,67}{0,07}$	$\frac{1,61}{0,23}$	$\frac{0,24}{0,03}$	$\frac{0,16}{0,02}$	$\frac{0,37}{0,04}$	$\frac{0,30}{0,07}$	$\frac{0,010}{0,001}$	$\frac{0,010}{0,001}$	$\frac{0,03}{0,01}$	$\frac{3,40}{0,33}$	$\frac{0,63}{0,08}$

Примечание. В числителе указано среднее значение, в знаменателе — стандартная ошибка.

В Лапландском заповеднике, по сравнению с фоном, наблюдалось существенное достоверное увеличение концентраций поллютантов: Cu — до 6 раз, Ni — до 13 раз и SO_4^{2-} — до 3 раз в подкروновых пространствах. В межкроновых пространствах и на открытой территории данные различия в концентрациях поллютантов были менее выражены: для Ni — до 2 раз и SO_4^{2-} — до 2,5 раза. В Лапландском заповеднике также наблюдалось увеличение кислотности дождевых вод по сравнению с фоном, что наиболее ярко выражено в подкроновых пространствах. Это указывает на высокий уровень воздушного промышленного загрязнения. Концентрации Ca, Mg и Na в дожде возрастали под кронами в Лапландском заповеднике по сравнению с фоном, их увеличение объясняется выщелачиванием этих элементов из крон деревьев в результате действия кислых осадков. В условиях аэротехногенного загрязнения ткани древесных растений обедняются малоподвижным

кальцием и натрием, которые накапливаются в стареющей, часто повреждённой хвое [40], а также магнием — элементом средней подвижности.

Динамика массы и химического состава опада хвои *Pinus sylvestris* L.

Масса опада хвои. Проективное покрытие крон деревьев в сосновом лесу в фоновых условиях составляло в среднем 38 %, тогда как в Лапландском заповеднике покрытие крон несколько выше — 53 %, что может быть связано с тем, что в более молодых лесах заповедника велико присутствие подроста, а процессы естественного изреживания ещё выражены слабо, нежели в фоновых условиях.

Анализ среднегодовых данных по массе опада хвои сосны с учётом доли площадей меж- и подкроновых пространств за период 2015–2023 гг. показал, что суммарная масса опада в изученных сообществах составила 48,5 в фоне и 70,7 г/м² на территории Лапландского заповедника. Под кронами деревьев в заповеднике опадает также больше хвои по сравнению с фоновыми условиями (51,5 против 22,3 г/м²), что может быть связано как с большей площадью подкроновых пространств, так и с более интенсивным опадением хвои, связанным с ослаблением деревьев из-за длительного воздействия комбината «Североникель». Литературные данные подтверждают, что в условиях воздушного загрязнения тяжёлыми металлами и кислотообразующими веществами наблюдается повреждение хвои древесных растений, уменьшение продолжительности её жизни и пролонгирование дефолиации деревьев, что способствует увеличению количества опада [1, 11, 13, 40–42].

Многолетняя динамика массы опада хвои на площадках не выявила существенных трендов изменения со временем поступления опада на всех изученных территориях (рис. 6). Однако, как и в случае со среднегодовыми значениями за изученный период, ежегодно общая масса опада хвои и масса в подкроновых пространствах на территории заповедника была в 1,5–3 раза выше, чем в фоновых условиях, что также может быть обусловлено большей площадью подкроновых пространств и интенсивным опадением хвои в условиях воздушного загрязнения.

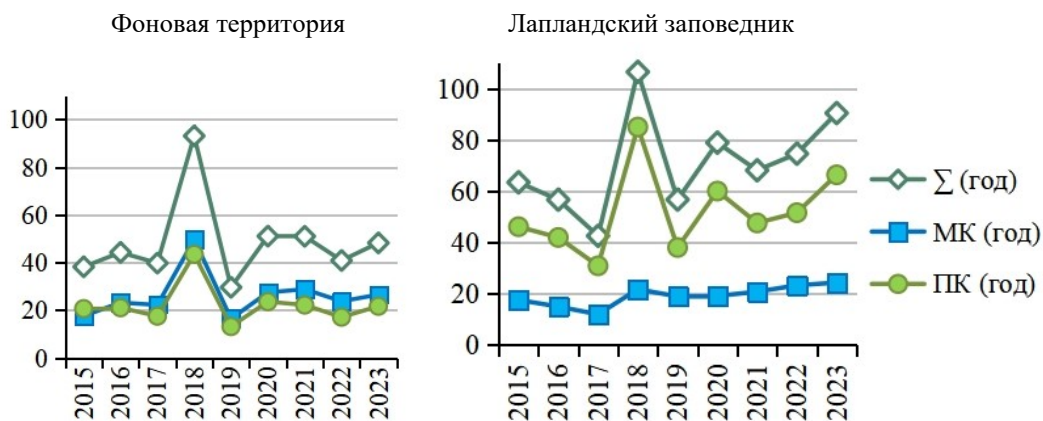


Рис. 6. Динамика (2015–2023 гг.) годовой массы опада хвои сосны на площадках в фоновых условиях и на территории Лапландского заповедника, г/м² в год: суммарно на всю площадь (Σ), между (МК) и под кронами (ПК) деревьев

Fig. 6. Dynamics (2015–2023) of the annual mass of pine needle litterfall on plots under background onditions and on the territory of the Lapland Nature Reserve, g/m² per year: in total for the entire area (Σ), between the crowns (BC) and under the crowns (UC) of trees

Содержание химических элементов в опаде хвои. Исследование содержания поллютантов и элементов питания на территории Лапландского заповедника и в условиях фона показали значительное превышение фоновых значений тяжёлых металлов и серы на территории заповедника: для меди и никеля различия составили 10–20 раз, серы — 2 раза (табл. 5).

Высокие концентрации этих элементов могут быть связаны с их повышенным содержанием в воздухе в зоне воздействия комбината «Североникель». В сосняках Лапландского заповедника наблюдалось более низкое содержание Са и Mg в опаде хвои сосны и более высокое, по сравнению

с фоном, содержание Р, что можно объяснить влиянием воздушного загрязнения: при приближении к металлургическим предприятиям возраст хвои в целом на ветвях снижается по причине её опадания не только в фенологические сроки, нарушаются процессы ретранслокации подвижных элементов [1, 40–42]. Кроме того, кальций и магний могут выщелачиваться из хвои на деревьях ещё и кислотными осадками [40].

Таблица 5

Содержание элементов питания, тяжёлых металлов и серы в опаде хвои сосны в сосновых лесах, мг/кг
Content of nutrients, heavy metals and sulfur in pine needle litterfall in pine forests, mg/kg

Пробная площадь	Ca	Mg	N	P	K	S	Cu	Ni
Фон	<u>4103</u> 135	<u>394</u> 10	<u>3278</u> 198	<u>303</u> 14	<u>650</u> 31	<u>207</u> 32	<u>1,9</u> 0,2	<u>3,3</u> 0,4
Лапландский заповедник	3835 107	277 9	<u>3519</u> 167	355 9	<u>555</u> 24	411 33	19,0 1,2	69,6 4,0

Примечания. 1. В числителе указано среднее значение, в знаменателе — стандартная ошибка.
2. Жирным шрифтом выделены достоверные различия ($p < 0,05$) по сравнению с фоновыми значениями.

Значительное превышение содержания тяжёлых металлов и дефицит элементов питания в опаде хвои сосны, наблюдаемые на территории заповедника, по сравнению с региональными фоновыми значениями в сочетании с более активным поступлением опада в результате влияния промышленного загрязнения приводят к повышенному поступлению поллютантов с опадом в почвы в лесах заповедника, о чём свидетельствуют результаты исследования химического состава почв (табл. 6).

Кислотность и химический состав почвы. Кислотность органогенного горизонта почвы на территории Лапландского заповедника была сопоставима с фоновыми значениями и варьировала от 3,67 до 4,08. Кислотность почв меж- и подкроновых пространств достоверно не различалась (табл. 6).

Таблица 6

Кислотность(pH) и содержание химических элементов (мг/кг)
в органогенном горизонте почвы сосновых лесов, 2023 г.

Acidity (pH) and content of chemical elements (mg/kg) in the organogenic horizon of pine forest soil, 2023

Пробная площадь	pH	Ca	K	Mg	P	Al	S	Cu	Ni
Межкroновое пространство									
Фон	<u>3,87</u> 0,02	<u>1507</u> 237	<u>753</u> 92	<u>314</u> 55	<u>234</u> 35	<u>69</u> 6	<u>101</u> 7	<u>0,16</u> 0,01	<u>0,55</u> 0,15
Лапландский заповедник	<u>3,79</u> 0,08	1091 53	<u>681</u> 123	182 23	<u>181</u> 43	98 8	<u>120</u> 17	22,00 4,16	49,78 5,17
Подкroновое пространство									
Фон	<u>3,90</u> 0,04	<u>1706</u> 400	<u>1079</u> 136	<u>421</u> 64	<u>313</u> 33	<u>59</u> 11	<u>128</u> 13	<u>0,26</u> 0,17	<u>0,95</u> 0,28
Лапландский заповедник	<u>3,93</u> 0,07	<u>1685</u> 391	573 65	190 27	162 32	100 12	<u>113</u> 15	54,58 4,03	65,28 4,66

Примечания. 1. В числителе указано среднее значение, в знаменателе — стандартная ошибка.
2. Жирным шрифтом выделены достоверные различия ($p < 0,05$) по сравнению с фоновыми значениями.

На территории Лапландского заповедника в почве межкroновых пространств отмечено достоверное ($p < 0,05$) снижение доступных для растений соединений Ca, Mg, в подкroновых — Mg, K, P, если сравнивать с фоновыми значениями. Снижение содержания основных катионов в органогенном горизонте почвы является следствием катионообменных реакций в почвенном поглощающем

комплексе: основные катионы вытесняются «кислыми» — ионами водорода и алюминия [43]. В почве заповедника содержание Al ($p < 0,05$) возрастало по сравнению с ненарушенными лесами. Другой причиной уменьшения содержания Ca и Mg является обеднение фотосинтезирующих и отмирающих органов растений (хвои сосны и ели, листьев берёзы, черники, брусники, вороники) этими элементами, о чём свидетельствуют проведённые нами ранее исследования [10, 40, 44]. Следовательно, поступление Ca и Mg в почву с растительным опадом было ниже, чем в фоновых условиях (см. табл. 5). Концентрация доступных для растений соединений серы в почве Лапландского заповедника не увеличивается, несмотря на значительное поступление соединений серы с атмосферными выпадениями. Это можно объяснить высокой миграционной способностью этого элемента. В почвенных водах фиксируется резкое возрастание концентраций сульфатов, которые способствуют миграции основных катионов [43].

Несмотря на существенное сокращение выбросов тяжёлых металлов со стороны комбината «Североникель», в почве Лапландского заповедника сохранились аномально высокие концентрации никеля и меди, многократно превышающие фоновые значения ($p < 0,05$). Так, превышение фоновых значений для меди составляло до 140–200 раз, для никеля — до 70–90 раз. Сохранение высокой степени загрязнения почв тяжёлыми металлами на фоне значительного снижения техногенной нагрузки подтверждается и результатами других исследований [3, 4, 28], что свидетельствует о высокой степени закрепления тяжёлых металлов в органогенном горизонте почвы, низкой скорости их вымывания в минеральные горизонты, что, в свою очередь, препятствует процессам самоочищения почвы.

Выводы

Современный температурный режим зонального лесного подзола Лапландского заповедника характеризуется следующими показателями: положительная среднегодовая температура органогенного горизонта, составляющая $+2,7 \pm 0,3 \dots +4,1 \pm 0,3$ °C; годовая сумма положительных температур в диапазоне $+1312 \dots +1676$ °C, которые поддерживаются не менее 190 дней в году; абсолютные летние максимумы в интервале $+15,9 \dots +22,0$ °C; продолжительность наиболее тёплого периода с активными температурами не менее 55 суток в июле-августе. В холодные годы продолжительность отрицательных температур подстилки не превышает 168 дней, или 5,6 месяцев.

Аэротехногенное загрязнение оказывает существенное влияние на формирование состава снеговых и дождевых вод, почвы, древесного опада сосновых лесов Лапландского заповедника, оно выражается в повышении концентраций тяжёлых металлов и кислотообразующих веществ и в выщелачивании элементов питания (кальций и магний) из древесного полога, что наиболее выражено под кронами деревьев. Атмосферные осадки в виде снега и дождя характеризуются высокими концентрациями элементов под кронами сосновых лесов по сравнению с межкронными пространствами и открытыми территориями, что объясняется их смывом и выщелачиванием из крон деревьев. На территории заповедника масса поступающего опада хвои на почву в 1,5–3 раза выше, чем в фоновых условиях, что особенно выражено в подкروновых пространствах и связано как с большей площадью подкроновых пространств, так и более интенсивным опадением хвои в условиях воздушного загрязнения. Несмотря на снижение объёма атмосферных выбросов, на современном этапе в почве и древесном опаде сосновых лесов заповедника сохраняются высокие концентрации тяжёлых металлов, многократно превышающие фоновые значения.

Таким образом, данные биогеохимического мониторинга показывают, что лесные экосистемы заповедника продолжают испытывать влияние атмосферных выбросов металлургического комбината «Североникель» как в результате ежегодного поступления поллютантов с атмосферными выпадениями, так и вследствие многолетнего их накопления в почвенно-растительном покрове.

Список источников

1. Рассеянные элементы в бореальных лесах / В. В. Никонов [и др.]. М.: Наука, 2004. 616 с.
2. Воробейчик Е. Л., Кайгородова С. Ю. Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объемов его выбросов // Почвоведение. 2017. № 8. С. 1009–1024. doi:10.7868/S0032180X17080135.

3. Запасы потенциально токсичных элементов в напочвенном покрове сосновых лесов северной тайги при аэротехногенном загрязнении / И. В. Лянгузова [и др.] // Ботанический журнал. 2023. Т. 108, № 11. С. 1001–1014. doi:10.31857/S0006813623110054.
4. Kashulina G. M. Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper-nickel smelter on the Kola peninsula // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51 P. 467–478. doi:10.1134/S1064229318040063.
5. Ayras M., Kashulina G. Regional patterns of element contents in the organic horizon of podzols in the central part of the Barents region (Finland, Norway and Russia), with special reference to heavy metals (Co, Cr, Fe, Ni, Pb, V and Zn) and sulphur as indicators of airborne pollution // J. Geochemical Exploration. 2000. No. 68. P. 127–144. doi:10.1016/S0375-6742(99)00082-5.
6. Effects of air pollution from a nickel-copper industrial complex on boreal forest vegetation in the joint Russian–Norwegian–Finnish border area / T. Myking [et al.] // Boreal Environ. Res. 2009. Vol. 14. P. 279–291.
7. Оценка состава дождевых выпадений в хвойных лесах на северном пределе распространения при аэротехногенном загрязнении / В. В. Ершов [и др.] // Экология. 2020. № 4. С. 265–274. doi:10.31857/S0367059720040058.
8. Derome J., Lindroos A.-J. Effects of heavy metal contamination on macronutrient availability and acidification parameters in forest soil in the vicinity of the Harjavalta Cu-Ni smelter. SW Finland // Environmental Pollution. 1998. Vol. 99, Iss. 2. P. 225–232. doi:10.1016/S0269-7491(97)00185-1.
9. Сухарева Т. А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Известия вузов. Лесной журнал. 2013. № 6 (336). С. 19–28.
10. Сухарева Т. А., Лукина Н. В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104. doi:10.7868/S0367059714020085.
11. Ярмишко В. Т., Лянгузова И. В. Многолетняя динамика параметров и состояния хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения на Европейском Севере // Известия СПбЛТА. 2013. № 2 (203). С. 30–46.
12. Lukina N., Nikonov V. Assessment of environmental impact zones in the Kola Peninsula forest ecosystems // Chemosphere. 2001. Vol. 42, Iss. 1. P. 19–34. doi:10.1016/S0045-6535(00)00095-3.
13. Lamppu J., Huttunen S. Relations between Scots pine needle element concentrations and decreased needle longevity along pollution gradients // Environmental Pollution. 2003. Vol. 122, Iss. 1. P. 119–126. doi:10.1016/S0269-7491(02)00274-9.
14. Решетникова Т. В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 74–81.
15. Уфимцев В. И., Егорова И. Н. Роль растительного опада в формировании фитогенных полей сосны обыкновенной на техногенных эловиях Кузбасса // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 116–120.
16. Aponte C., García L. V., Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 309. P. 36–46. doi:10.1016/j.foreco.2013.05.035.
17. Семенов-Тянь-Шанский О. И. Северный олень. М.: Наука. 1977. 93 с.
18. Организация мониторинговых исследований состояния северотаёжных лесов на территории Лапландского заповедника / В. В. Ершов [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. 2021. Т. 13, №. 2. С. 34–42.
19. Лянгузова И. В., Баркан В. Ш. Сравнительный анализ уровня загрязнения органогенного горизонта Al-Fe-подзолов и болотных почв в локальной зоне воздействия медно-никелевого комбината // Принципы экологии. 2019. №. 4 (34). С. 57–68.
20. Barkan V. S., Pankratova R. P., Silina V. Soil contamination by nickel and copper // Aerial Pollution in Kola Peninsula: International Workshop (April 14–16, 1992, St. Petersburg, Russia): proceedings / Laboratory of Ecological Zoology, Department of Biology, University of Turku. 1993. 119 p.
21. Аблаева З. Х. Влияние промышленного загрязнения на видовой состав, распространение, рост и развитие лишайников в районе города Мончегорска (1973–1976 гг.): отчёт // Архив Лапландского государственного природного биосферного заповедника. 1977. 82 с.
22. Влияние промышленного загрязнения на еловые леса Лапландского заповедника за период с 1981–1983 гг.: отчёт. Мончегорск, 1984. 123 с.
23. Отчёт Московского специализированного лесоустroительного предприятия по лесопатологическому обследованию Лапландского государственного заповедника Государственного комитета СССР по охране природы // Архив Лапландского государственного природного биосферного заповедника. М., 1990. Т. 1. 112 с.

24. Реакция лесных экосистем на сокращение атмосферных промышленных выбросов в Кольской Субарктике / Г. Н. Копчик [и др.] // Журнал общей биологии. 2016. Т. 77, № 2. С. 145–163.
25. Михайлова И. Н. Динамика сообществ эпифитных лишайников в начальный период после снижения выбросов медеплавильного завода // Экология. № 1. 2020. С. 43–50. doi:10.31857/S0367059720010072.
26. Atmospheric deposition in coniferous and deciduous tree stands in Poland / A. Kowalska [et al.] // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 133. P. 145–155. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.03.033.
27. 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. Vol. 100. P. 245–249. doi:10.1007/s00128-017-2219-y.
28. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России / отв. ред. В. Т. Ярмишко. СПб.: Изд-во ВВМ, 2009. 276 с.
29. Шергина О. В., Михайлова Т. А., Калугина О. В. Изменение биогеохимических показателей в сосновых лесах при техногенном загрязнении // Сибирский лесной журнал. 2018. № 4. С. 29–38. doi:10.15372/sjfs20180404.
30. Сухарева Т. А., Ершов В. В., Иванова Е. А. Содержание тяжёлых металлов и серы в лесных экосистемах в зоне воздействия комбината «Печенганикель» в связи с сокращением атмосферных выбросов // Лесоведение. 2025. № 1. С. 106–123. doi:10.31857/S0024114825010094.
31. Лукина Н. В., Полянская Л. М., Орлова М. А. Питательный режим почв северотаёжных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.
32. Лянгузова И. В., Гольдвирт Д. К., Фадеева И. К. Пространственно-временная динамика загрязнения Al-Fe-гумусового подзола в зоне влияния комбината цветной металлургии // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1261–1276.
33. Методика мониторинга лесов по международной программе ICP Forests / Российский центр защиты леса. М.: ЦЭПЛ РАН, 2008. 46 с.
34. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna: IUSS, 2022. 236 p.
35. Переверзев В. Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.
36. Содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области / Т. А. Сухарева [и др.] // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6, № 2. doi:10.31509/2658-607x-202362-125.
37. Термохроны: технические характеристики. URL: <http://www.elin.ru> (дата обращения: 04.02.2025).
38. Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. Version 2020-1 / L. Ukonmaanaho [et al.] // Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests / UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.); Thünen Institute for Forests Ecosystems. Eberswalde, 2020. P. 19.
39. Снежный покров на вырубках разных лет в пихтово-кедровых лесах Енисейского края / Т. А. Буренина [и др.] // Лесоведение. 2013. № 6. С. 26–36.
40. Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 316 с.
41. Nieminen T., Helmisaari H-S. Nutrient retranslocation in the foliage of *Pinus sylvestris* L. growing along a heavy metal pollution gradient // Tree Physiology. 1996. Vol. 16, Iss. 10. P. 825–831. doi:10.1093/treephys/16.10.825.
42. Rautio P., Huttunen S., Lampu J. Effects of sulphur and heavy metal deposition on foliar chemistry of Scots pines in Finnish Lapland and on the Kola Peninsula // Chemosphere. 1998. Vol. 36, Iss. 4. P. 979–984. doi:10.1016/S0045-6535(97)10158-8.
43. Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения: в 2 ч. Ч. 1. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 216 с.
44. Влияние воздушного промышленного загрязнения на химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на северном пределе распространения / Е. А. Иванова [и др.] // Лесоведение. 2022. № 2. С. 157–171. doi:10.31857/S002411482201003X.

References

1. Nikonov V. V., Lukina N. V., Bezel' V. S., Bel'skij E. A., Bepalova A. Ju., Golovchenko A. V., Gorbacheva T. T., Dobrovol'skaja T. G., Dobrovol'skij V. V., Zukert N. V., Isaeva L. G., Lapenis A. G., Maksimova I. A., Marfenina O. E., Panikova A. N., Pinskiy D. L., Poljanskaja L. M., Stajnnes E., Utkin A. I., Frontas'eva M. V., Cibul'skij V. V., Chernov I. Ju., Jacenko-Hmelevskaja M. A. *Rassejannyye element v boreal'nyh lesah* [Scattered elements in boreal forests]. Moscow, Nauka, 2004, 616 p.
2. Vorobejchik E. L., Kajgorodova S. Ju. *Mноголетная динамика содержания тяжёлых металлов в верхних горизонтах почвы в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объёма выбросов*

[Multiyear dynamics of heavy metal content in the upper soil horizons in the area of impact of the smelter during the period of reduction of its emissions]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2017, no. 8, pp. 1009–1024. doi:10.7868/S0032180X17080135 (In Russ.).

3. Ljanguzova I. V., Beljaeva A. I., Kataeva M. N., Volkova E. N. Zapasy potencial'no toksichnyh elementov v napochvennom pokrove sosnovykh lesov severnoj tajgi pri aerotehnogenom zagryaznenii [Stocks of potentially toxic elements in the ground cover of pine forests of northern taiga under aerotechnogenic pollution]. *Botanicheskij zhurnal* [Botanical Journal], 2023, Vol. 108, no. 11, pp. 1001–1014. doi:10.31857/S0006813623110054 (In Russ.).
4. Kashulina G. M. Monitoring of soil contamination by heavy metals in the impact zone of copper-nickel smelter on the Kola Peninsula. *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51 pp. 467–478. doi:10.1134/S1064229318040063.
5. Ayras M., Kashulina G. Regional patterns of element contents in the organic horizon of podzols in the central part of the Barents region (Finland, Norway and Russia), with special reference to heavy metals (Co, Cr, Fe, Ni, Pb, V and Zn) and sulphur as indicators of airborne pollution. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, no. 68, pp. 127–144. doi:10.1016/S0375-6742(99)00082-5.
6. Myking T., Aarrestad P. A., Derome J., Bakkestuen V., Bjerke J. W., Gytarsky M., Isaeva L., Kara-Ban R., Korotkov V., Lindgren M., Lindroos A.-J., Røseberg I., Salemaa M., Tømmervik H. & Vassilieva N. Effects of air pollution from a nickel-copper industrial complex on boreal forest vegetation in the joint Russian–Norwegian–Finnish border area. *Boreal Env. Res.*, 2009, Vol. 14, pp. 279–296.
7. Ershov V. V., Lukina N. V., Danilova M. A., Isaeva L. G., Sukhareva T. A., Smirnov V. E. Ocenka sostava dozhddevykh vypadenij v hvojnnykh lesakh na severnom predele rasprostraneniya pri aerotehnogenom zagryaznenii [Estimation of rainfall composition in coniferous forests at the northern limit of distribution under aerotechnogenic pollution]. *Ekologiya* [Ecology], 2020, no. 4, pp. 265–274. doi:10.31857/S0367059720040058 (In Russ.).
8. Derome J., Lindroos A.-J. Effects of heavy metal contamination on macronutrient availability and acidification parameters in forest soil in the vicinity of the Harjavalta Cu-Ni smelter. SW Finland. *Environmental Pollution*, 1998, Vol. 99, Iss. 2. pp. 225–232. doi:10.1016/S0269-7491(97)00185-1.
9. Sukhareva T. A. Prostranstvenno-vremennaya dinamika mikroelementnogo sostava hvojnnykh derev'ev i pochvy v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya [Spatial and temporal dynamics of trace element composition of coniferous trees and soil under conditions of industrial pollution]. *Izvestiyavuzov. Lesno jzhurnal* [University news. Forestry journal], 2013, Vol. 6, no. 336, pp. 19–28. (In Russ.).
10. Sukhareva T. A., Lukina N. V. Mineral'nyj sostav assimiliruyushchih organov hvojnnykh derev'ev posle snizheniya urovnya atmosfernogo zagryazneniya na Kol'skom poluoostrove [Mineral composition of assimilating organs of coniferous trees after reduction of atmospheric pollution on the Kola Peninsula]. *Ekologiya* [Ecology], 2014, no. 2, pp. 97–104. doi:10.7868/S0367059714020085 (In Russ.).
11. Jarmishko V. T., Lyanguzova I. V. Mnogoletnyaya dinamika parametrov i sostoyaniya hvoi *Pinus sylvestris* L. v usloviyakh aerotehnogenogo zagryazneniya na Evropejskom Severe [Multiyear dynamics of parameters and condition of *Pinus sylvestris* L. needles under conditions of aerotechnogenic pollution in the European North]. *Izvestiya SPbLTA* [News of S.M. Kirov St. Petersburg State Forestry University], 2013, Vol. 2, no. 203, pp. 30–46. (In Russ.).
12. Lukina N., Nikonov V. Assessment of environmental impact zones in the Kola Peninsula forest ecosystems. *Chemosphere*, 2001, Vol. 42, Iss. 1, pp. 19–34. doi:10.1016/S0045-6535(00)00095-3.
13. Lamppu J., Huttunen S. Relations between Scots pine needle element concentrations and decreased needle longevity along pollution gradients. *Environmental Pollution*, 2003, Vol. 122, Iss. 1, pp. 119–126. doi:10.1016/S0269-7491(02)00274-9.
14. Reshetnikova T. V. Lesnye podstilki kak depo biogennykh elementov [Forest litters as a depot of biogenic elements]. *Vestnik KrasGAU* [Krasnoyarsk State Agrarian University News], 2011, no. 12, pp. 74–81. (In Russ.).
15. Ufimcev V. I., Egorova I.N. Rol' rastitel'nogo opada v formirovanii fitogennykh polej sosny obyknovЕННОj na tekhnogennykh elyuvijah Kuzbassa [The role of plant fall in the formation of phytogenic fields of common pine on anthropogenic eluviae of Kuzbass]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2016, no. 4, pp. 116–120. (In Russ.).
16. Aponte C., García L.V., Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence. *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 309, pp. 36–46. doi:10.1016/j.foreco.2013.05.035.
17. Semenov-Tyan-Shanskij O. I. *Severnyj olen'* [Northern Reindeer]. Moscow, Nauka, 1977, 93 p.
18. Ershov V. V., Isaeva L. G., Sukhareva T. A., Urbanavichyus G. P., Ivanova E. A., Belova E. A. Organizaciya monitoringovykh issledovanij sostoyaniya severotaezhnykh lesov na territorii Laplandsko gozapovednika [Organisation of monitoring studies of the state of northern taiga forests on the territory of the Lapland Reserve].

- Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Bulletin of the Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences], 2021, Vol. 13, no. 2, pp. 34–42. (In Russ.).
19. Lyanguzova I. V., Barkan V. Sh. Sravnitel'nyj analiz urovnya zagryazneniya organogennoho gorizonta Al-Fe-podzolov i bolotnyh pochv v lokal'noj zone vozdejstviya medno-nikelevogo kombinata [Comparative analysis of the pollution level of organogenic horizon of Al-Fe-podzols and swamp soils in the local impact zone of copper-nickel combine]. *Principy ekologii* [Principles of Ecology], 2019, no. 4 (34), pp. 57–68. (In Russ.).
 20. Barkan V. S., Pankratova R. P., Silina V. Soil contamination by nickel and copper. Proceedings “Aerial Pollution in Kola Peninsula: International Workshop” (April 14–16, 1992, St. Petersburg). 1993, 119 p.
 21. Ablaeva Z. H. Otchet “Vliyanie promyshlennogo zagryazneniya na vidovoj sostav, rasprostranenie, rost i razvitie lishajnikov v rajone goroda Monchegorska” (1973–1976 gg.) [Report ‘Influence of industrial pollution on species composition, distribution, growth and development of lichens in the area of the city of Monchegorsk’ (1973–1976)]. *Arhiv Laplandskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika* [Archive of the Lapland State Natural Biosphere Reserve], 1977, 82 p. (In Russ.).
 22. Otchet “Vliyanie promyshlennogo zagryazneniya na elovye lesa Laplandskogo zapovednika za period s 1981–1983 gg.” [Report “Impact of industrial pollution on spruce forests of the Lapland Reserve for the period from 1981–1983”]. Monchegorsk, 1984, 123 p. (In Russ.).
 23. Otchet Moskovskogo specializirovannogo lesoustroitel'nogo predpriyatiya polesopatologicheskemu obsledovaniyu Laplandskogo gosudarstvennogo zapovednika Gosudarstvennogo komiteta SSSR po ohrane prirody [Report of the Moscow specialised forest inventory enterprise on forest pathology survey of the Lapland State Nature Reserve of the USSR State Committee for Nature Protection]. *Arhiv Laplandskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika* [Archive of the Lapland State Natural Biosphere Reserve]. Moscow, 1990, Vol. 1, 112 p. (In Russ.).
 24. Koptsik G. N., Koptsik S. V., Smirnova I. E., Kudryavceva A. D., Turbabina K. A. Reakciya lesnyh ekosistem na sokrashchenie atmosferynyh promyshlennyh vybrosov v Kol'skoj Subarktike [Response of forest ecosystems to the reduction of atmospheric industrial emissions in the Kola Subarctic]. *Zhurnal obshchej biologii* [Journal of General Biology], 2016, Vol. 77, no. 2, pp. 145–163. (In Russ.).
 25. Mihajlova I. N. Dinamika soobshchestv epifitnyh lishajnikov v nachal'nyj period posle snizheniya vybrosov medeplavil'nogo zavoda [Dynamics of epiphytic lichen communities in the initial period after the reduction of smelter emissions]. *Ekologiya* [Ecology], 2020, no. 1, pp. 43–50. doi:10.31857/S0367059720010072 (In Russ.).
 26. Kowalska A., Astel A., Boczoń A., Polkowska Ż. Atmospheric deposition in coniferous and deciduous tree stands in Poland. *Atmospheric Environment*, 2016, Vol. 133, pp. 145–155. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.03.033.
 27. 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, Vol. 100, pp. 245–249. doi:10.1007/s00128-017-2219-y.
 28. *Dinamika lesnykh soobshchestv severo-zapada Rossii* [Dynamics of forest communities in the North-West of Russia]. Saint Petersburg, VVM Publ., 2009, 276 p.
 29. Shergina O. V., Mihajlova T. A., Kalugina O. V. *Izmenenie biogeohimicheskikh pokazatelej v sosnovykh leshakh pri tekhnogennom zagryaznenii* [Changes in biogeochemical indicators in pine forests under anthropogenic pollution]. *Sibirskij lesnoj zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2018, no. 4, pp. 29–38. doi:10.15372/SJFS20180404 (In Russ.).
 30. Sukhareva T. A., Ershov V. V., Ivanova E. A. Soderzhanie tyazhyolykh metallov i sery v lesnykh ekosistemakh v zone vozdejstviya kombinata “Pechenganikel” v svyazi s sokrashcheniem atmosferynyh vybrosov [Content of heavy metals and sulfur in forest ecosystems in the impact zone of the Pechenganickel Combine in connection with the reduction of atmospheric emissions]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2025, no. 1, pp. 106–123. (In Russ.).
 31. Lukina N. V., Polyanskaya L. M., Orlova M. A. *Pitatel'nyj rezhim pochv v severotaezhnykh lesakh* [Nutrient regime of soils of northern taiga forests]. Moscow, Nauka, 2008, 342 p.
 32. Lyanguzova I. V., Gol'dvirt D. K., Fadeeva I. K. Prostranstvenno-vremennaya dinamika zagryazneniya Al-Fe-gumusovogo podzola v zone vliyaniya kombinata cvetnoj metallurgii [Spatial and temporal dynamics of Al-Fe-humus podzol contamination in the zone of influence of non-ferrous metallurgy plant]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2016, no. 10, pp. 1261–1276. (In Russ.).
 33. *Metodika monitoringa lesov po mezhdunarodnoj programme ICP Forests* [Methodology of forest monitoring under the international program ICP Forests]. Moskva, CEPL RAN, 2008, 46 p.
 34. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna, IUSS, 2022, 236 p.
 35. Pereverzev V. N. *Lesnye pochvy Kol'skogo poluoostrova* [Forest soils of the Kola Peninsula]. Moscow, Nauka, 2004, 232 p.

36. Sukhareva T. A., Ivanova E. A., Ershov V. V., Zenkova I. V., Korneykova M. A., Shtabrovskaya I. M., Soshina A. S. Soderzhanie i zapasy ugleroda i azota v nazemnykh ekosistemakh Murmanskoy oblasti [Content and stocks of carbon and nitrogen in terrestrial ecosystems of the Murmansk region]. *Voprosy lesnoj nauki* [Forest science issues], 2023, Vol. 6, no. 2. doi:10.31509/2658-607x-202362-125 (In Russ.).
37. *Termohrony: tekhnicheskie harakteristiki* [Thermochrons: technical characteristics]. 2025. (In Russ.). Available at: <http://www.elin.ru> (accessed 04.02.2025).
38. Ukonmaanaho L., Pitman R., Bastrup-Birk A., Breda N., Rautio P. Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. Version 2020-1. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre: Manual on methods and criteria for harmonized sampling. assessment. monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute for Forests Ecosystems. Eberswalde, 2020, 19 p.
39. Burenina T. A., Shishikina S., Onuchin A. A., Borisov A. N. Snezhnyj pokrov na vyrubkah raznykh let v pihtovo-kedrovyykh lesakh Enisejskogo kryazha [Snow cover on clearcuts of different years in fir-cedar forests of the Yenisei ridge]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2013, no. 6, pp. 26–36. (In Russ.).
40. Lukina N. V., Nikonov V. V. *Pitatel'nyj rezhim lesov severnoj tajgi: prirodnye i tekhnogennye aspekty* [Nutrient regime of northern taiga forests: natural and anthropogenic aspects]. Apatity, KNC RAN, 1998, 316 p.
41. Nieminen T., Helmisaari H-S. Nutrientretranslocation in the foliage of *Pinus sylvestris* L. growing along a heavy metal pollution gradient. *Tree Physiology*, 1996, Vol. 16, Iss. 10, pp. 825–831. doi:10.1093/treephys/16.10.825.
42. Rautio P., Huttunen S., Lamppu J. Effects of sulphur and heavy metal deposition on foliar chemistry of Scots pines in Finnish Lapland and on the Kola Peninsula. *Chemosphere*, 1998, Vol. 36, Iss. 4, pp. 979–984. doi:10.1016/S0045-6535(97)10158-8.
43. Lukina N. V., Nikonov V. V. *Biogeohimicheskie cikly v leashe Severa v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya. Ch. 1* [Biogeochemical cycles in Northern forests under conditions of aerotechnogenic pollution. Part 1]. Apatity, KSC RAS, 1996, 216 p.
44. Ivanova E. A., Lukina N. V., Smirnov V. E., Isaeva L. G. Vliyanie vozdušnogo promyshlennogo zagryazneniya na himicheskij sostav opada hvoi sosny v sosnovykh leashe na severnom predele rasprostraneniya [Influence of airborne industrial pollution on the chemical composition of pine needle fall in pine forests at the northern limit of distribution]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2022, no. 2, pp. 157–171. doi:10.31857/S002411482201003X (In Russ.).

Информация об авторах

Т. А. Сухарева — кандидат биологических наук, заведующая лабораторией;
В. В. Ершов — кандидат биологических наук, научный сотрудник;
Е. А. Иванова — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник;
И. М. Штабровская — инженер I категории;
Н. Л. Алфертьев — заместитель директора по научной работе;
Д. А. Живов — ведущий инженер;
Н. С. Рябов — инженер I категории

Information about the authors

T. A. Sukhareva — PhD (Biology), Head of the laboratory;
V. V. Ershov — PhD (Biology), Research;
E. A. Ivanova — PhD (Biology), Junior research;
I. M. Shtabrovskaya — Engineer;
N. L. Alfertev — Deputy Director for Scientific Work;
D. A. Zhivov — Leading Engineer;
N. S. Ryabov — Engineer

Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 25.05.2025; принята к публикации 29.05.2025.
The article was submitted 19.02.2025; approved after reviewing 25.05.2025; accepted for publication 29.05.2025.