

Т. А. Сухарева^{1}, В. В. Ершов¹, В. Ф. Рапута²*

Динамика содержания тяжёлых металлов в листьях *Betula pubescens* и снежном покрове в индустриально развитом регионе Арктической зоны РФ (Мурманская область)

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН,
Мурманская обл., г. Апатиты, Российская Федерация

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Аннотация. Выполнена оценка динамики состава снега и листьев березы в северотаежных лесах, формирующихся под влиянием атмосферных выбросов медно-никелевого комбината «Североникель» в Мурманской области (г. Мончегорск). Объекты исследований представляют собой наиболее распространенные в бореальной зоне ельники кустарничково-зеленомошные и сосняки кустарничково-лишайниковые на разных стадиях техногенной дигрессии: фон, дефолирующие леса и редколесья. В работе представлены данные за 30-летний период наблюдений (1993 по 2023 гг.). Показано значительное варьирование в снеге содержания Ni, Cu, SO₄²⁻, в листьях березы – Ni, Cu в лесах, подверженных аэротехногенному загрязнению. Концентрации приоритетных поллютантов в снеговых и растительных пробах на стадиях дефолирующих лесов и техногенных редколесий значительно превышают региональные фоновые значения. Многолетняя динамика состава атмосферных выпадений в дефолирующих лесах демонстрирует тренды снижения концентраций сульфатов и меди. В техногенных редколесьях достоверных изменения концентраций Ni, Cu, SO₄²⁻ в зимних выпадениях не выявлено. Это может быть связано с продолжающимися процессами седиментации крупных частиц вблизи комбината. С 1993 по 2023 гг. на стадии дефолирующих лесов в листьях березы произошло достоверное снижение концентрации Ni (в 1.3 - 2.3 раза) и Cu (в 3 - 5.2 раза). На стадии сосновых редколесий в период с 2008 по 2023 гг. валовое содержание Ni снизилось в 6.2 раза, Cu – в 5 раз. Содержание Cu в листьях березы в 2023 г. стало соответствовать уровню природного варьирования в дефолирующих лесах. Применение модели малопараметрической реконструкции полей регионального загрязнения снежного покрова и *Betula pubescens* показало систематическое превышение восстановленных концентраций над измеренными в средней и дальней зонах наблюдения, что может быть связано с проявлением процессов трансформации.

Ключевые слова: северотаежные леса, промышленное загрязнение, биогеохимический мониторинг, тяжёлые металлы, снег, листья берёзы

T. A. Sukhareva^{1}, V. V. Ershov¹, V. F. Raputa²*

Dynamics heavy metal content in leaves of the *Betula pubescens* and snow cover in the industrially developed region of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk region)

¹ Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russian Federation

² Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Abstract. The dynamics of snow and birch leaves composition in the north taiga forests formed under the influence of atmospheric emissions from the Severonickel copper-nickel smelter in the Murmansk region (Monchegorsk) was assessed. The objects of research are the most widespread in the boreal zone spruce forests of shrubby-green-moss and pine forests of shrubby-lichen at different stages of anthropogenic digression: background, defoliating forests and sparse forests. Significant variation of Ni, Cu, SO_4^{2-} content in snow, Ni, Cu content in birch leaves in forests exposed to aerotechnogenic pollution is shown. Concentrations of priority pollutants in snow and vegetation samples at the stages of defoliating forests and technogenic sparse forests significantly exceed regional background values. The long-term dynamics of atmospheric precipitation composition in defoliating forests demonstrates trends of decreasing concentrations of sulfates and copper. In technogenic sparse forests, no significant changes in the concentrations of Ni, Cu, SO_4^{2-} in winter precipitation were detected. This may be related to the ongoing processes of sedimentation of large particles near the smelter. From 1993 to 2023, at the defoliating forest stage, there was a significant decrease in Ni (1.3 - 2.3-fold) and Cu (3 - 5.2-fold) concentrations in birch leaves. At the stage of pine sparse forests in the period from 2008 to 2023, the gross Ni content decreased by 6.2 fold, Cu - by 5 fold. Cu content in birch leaves in 2023 corresponded to the level of natural variation in defoliating forests. Application of the model of low-parameter reconstruction of regional pollution fields of snow cover and *Betula pubescens* showed a systematic excess of reconstructed concentrations over the measured ones in the middle and far observation zones, which may be associated with the manifestation of transformation processes.

Keywords: north taiga forests, industrial pollution, biogeochemical monitoring, heavy metals, snow, birch leaves

Введение

Мурманская область – один из наиболее индустриально развитых и урбанизированных регионов, который полностью входит в Арктическую зону РФ. Более восьмидесяти лет лесные экосистемы Мурманской области подвергаются интенсивному воздействию атмосферного загрязнения, которое распространяется на значительные расстояния.

Химический состав абиотических и биотических компонентов лесных биогеоценозов позволяет получать достоверную информацию об происходящих пространственно-временных изменениях в экосистемах. Оценка состояния атмосферы по степени загрязнения снежного покрова является традиционным методом биогеохимического мониторинга нарушенных техногенным воздействием территорий [1–4]. Снежный покров обладает свойством накопления основных поллютантов, которые адсорбируются на поверхности кристаллов в процессе их выпадения, что позволяет использовать его в качестве индикатора загрязнения атмосферы. Листовая диагностика широко применяется для оценки степени загрязнения растительного покрова. Результаты многочисленных исследований, посвященных изучению атмосферных выпадений, почв, растительности показали, что химический состав компонентов лесных экосистем значительно трансформируется под влиянием аэротехногенного загрязнения [2, 5–13]. Изучение современного состояния лесов в зоне продолжительного техногенного воздействия в период после сокращения атмосферных выбросов является особенно

важным для прогнозирования динамики биогеохимических циклов и устойчивого функционирования лесов и оценки устойчивости наземных экосистем.

Цель исследования – оценка пространственно-временной динамики содержания тяжёлых металлов в снежном покрове и ассимилирующих органах березы в периоды с разной эмиссионной нагрузкой на лесные экосистемы (1993-2023 гг.) в зоне воздействия медно-никелевого комбината «Североникель».

Объекты и материалы исследования

Климатические условия Мурманской области можно охарактеризовать как малоблагоприятные для формирования и функционирования наземных биогеоценозов [14]. Кроме того, в Мурманской области функционирует самый мощный в Северной Европе источник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу – медно-никелевый комбинат «Североникель» (г. Мончегорск), в выбросах которого преобладают диоксид серы и соединения тяжелых металлов (никель, медь и др.). Согласно данным АО «Кольская ГМК», предприятие в течение многих лет соблюдает норматив предельно допустимых выбросов, совершенствует технологии очистки, что способствовало снижению выбросов основных поллютантов за период 1993-2023 гг: SO₂ (тыс.тон) – с 145 до 13.0 (в 11.2 раза); Cu (тонн/год) – с 1049 до 60.6 (в 17.3 раза); Ni (тонн/год) – с 1960 до 7.6 (в 257.9 раз).

Исследования проводили на 9 пробных площадях постоянного наблюдения (ППН) Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Пробные площади представляют собой разные стадии техногенной дигрессии еловых и сосновых лесов: фон, дефолирующие леса и техногенные редколесья. ППН расположены по градиенту загрязнения комбината «Североникель» на различном удалении от источника загрязнения: в техногенных редколесьях в 7–10 км, в дефолирующих лесах в 28–31 км и на фоновой территории, в более чем 150 км. Отбор проб снега осуществляли ежегодно с 1995 по 2022 гг. в подкروновых и межкروновых пространствах в трехкратной повторности. Отбор проб листьев березы (*Betula pubescens Ehrh.*) проводили 1993, 2008, 2017, 2023 гг. в 5-кратной повторности в конце вегетационного периода (август).

Химико-аналитические исследования осуществлялись стандартными методами в Центре коллективного пользования физико-химических методов анализа природных сред и биологических объектов ИППЭС КНЦ РАН. Кислотность (рН водной вытяжки) проб снега измеряли потенциометрически. Концентрации водорасстворимых фракций Ni, Cu в снеговых пробах и валового содержания Ni, Cu в растительных пробах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии; SO₄²⁻ в снеговой воде – методом ионообменной хроматографии.

Для сравнения химического состава проб на разных пробных площадях использовали U-критерий Манна-Уитни в программном обеспечении STATISTICA 13.3. Рассчитан коэффициент концентрации (Kc) – отношение концентрации элемента в растениях по отношению к среднефоновому (региональному) содержанию.

Рассмотрено применение модели малопараметрической реконструкции полей регионального загрязнения снежного покрова и листьев березы на значитель-

ных удалениях от источника (более 5–7 км) в зоне влияния атмосферных выбросов медно-никелевого комбината «Североникель».

Результаты и обсуждения

Атмосферные выпадения (в виде снега). Зимние атмосферные выпадения приурочены к периоду биологического покоя. В бореальных лесах продолжительность залегания снегового покрова составляет от ста до двухсот дней в году, что определяет значительную роль осадков в виде снега в биогеохимических циклах.

В северотаежных лесах на стадиях дефолирующих лесов и техногенных редколесий концентрации Ni, Cu, SO_4^{2-} в снеговых водах подкروновых пространств достоверно выше до 3 раз ($p < 0.05$) по сравнению с межкроновыми. На фоновой территории более высокое содержание в подкроновых пространствах выявлено для SO_4^{2-} ($p < 0.05$). Выявленная закономерность связана со смывом и выщелачиванием этих элементов из тканей деревьев, что обусловлено частыми оттепелями на Кольском полуострове в зимний период. Показатель pH снега под кронами ниже, чем в межкроновых пространствах на всех обследованных ППН.

В дефолирующих лесах наблюдается увеличение концентраций соединений SO_4^{2-} – до 3 раз, Cu – до 4 раз, Ni – до 7 раз по сравнению с фоном. Показатель pH снижается по сравнению с фоновой территорией, что наиболее ярко выражено в подкроновых пространствах. В редколесьях по сравнению с фоном достоверно увеличиваются концентрации SO_4^{2-} до 4 раз, Cu – до 100 раз, Ni – до 130 раз. Повышение концентраций поллютантов в зоне воздействия комбината свидетельствует о существенном воздействии промышленного загрязнения на лесные экосистемы. Помимо этого, наблюдается увеличение кислотности в редколесьях по сравнению с фоновыми значениями.

За период с 1995 по 2022 гг. многолетняя динамика концентраций элементов в снеге северотаежных лесов на разных стадиях техногенной дигрессии характеризуется значительной вариабельностью. В подкроновых и межкроновых пространствах фоновых северотаежных лесов обнаруживается увеличение концентраций меди и никеля в 2016 и 2017 гг. Других отчетливых тенденций в многолетней динамике соединений элементов не обнаружено. В межкроновых пространствах дефолирующих лесов наблюдается снижение концентраций сульфатов. Отмечается снижение концентраций Cu в еловых подкроновых и межкроновых пространствах. Это может быть связано со снижением комбинатом выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (рис. 1, 2).

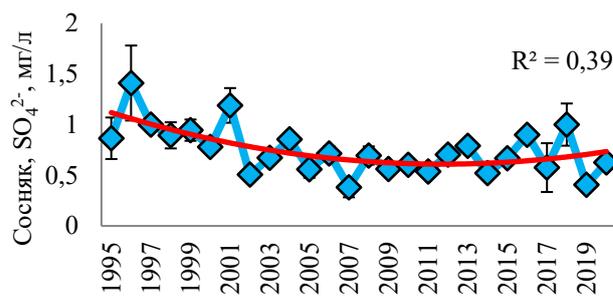
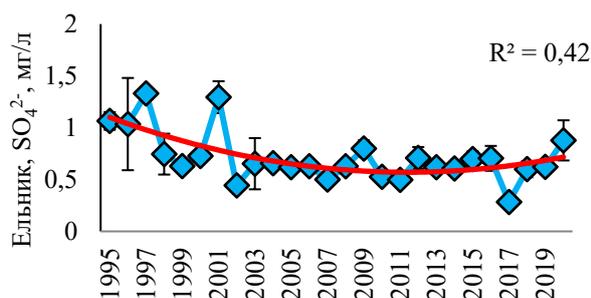


Рис. 1. Концентрация сульфатов в снеге в межкروновых пространствах дефолирующих лесов

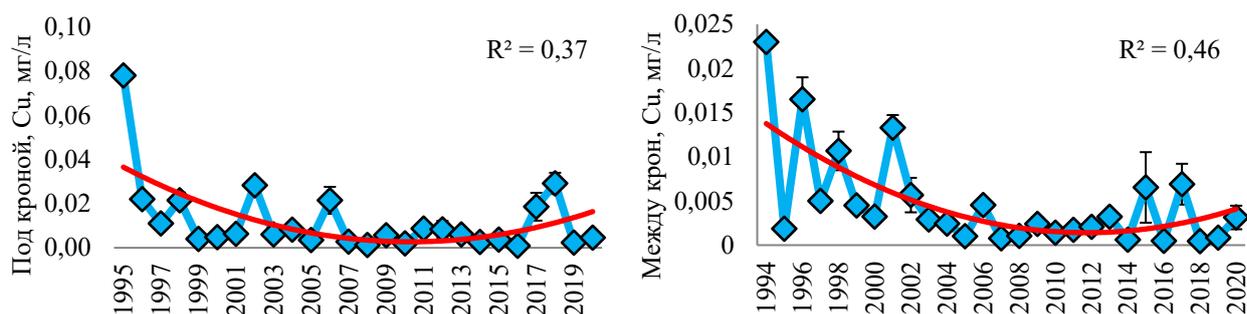


Рис. 2. Концентрация меди в снеге в подкروновых и межкروновых пространствах дефолирующего ельника

В техногенных редколесьях четких тенденций изменения концентраций Ni, Cu, SO_4^{2-} в зимних выпадениях не выявлено. Это может быть связано с продолжающимися процессами седиментации крупных частиц вблизи комбината

Берёза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) является типичным древесным растением бореальных лесов. Березу часто используют в биондикационных исследованиях, благодаря высоким газопоглощающим и пылеосаждающим свойствам.

В северотаежных лесах фоновые концентрации Ni в листьях березы варьируют от 1.6 до 5.5 мг кг⁻¹, Cu – 3.1 до 7.5 мг кг⁻¹. В дефолирующих лесах содержание Ni значительно возрастает ($p < 0.05$) по сравнению с фоном. Согласно данным 2023 г., в дефолирующих лесах концентрации Ni изменяются в диапазоне от 23.0 до 29.7 мг кг⁻¹, в техногенных редколесьях – от 10.9 до 25.7 мг кг⁻¹. Содержания Cu в дефолирующих лесах не превышают значений регионального фона и варьируют от 3.7 до 6.0 мг кг⁻¹. В техногенных редколесьях концентрации Cu составляют 9.1-9.7 мг кг⁻¹, что выше уровня природного варьирования для этого элемента.

Анализ коэффициентов концентрации поллютантов в листьях березы свидетельствует, что на современном этапе сохраняется высокий уровень загрязнения листьев березы никелем в условиях атмосферного загрязнения. Аномальными считаются концентрации, Kс которых равен или больше 1.5 [15]. Коэффициенты Kс для Ni в листьях березы дефолирующих лесов и техногенных редколесий значительно превышают установленное значение (рис. 3). Рассчитанные Kс для меди свидетельствуют, что концентрация этого элемента в растительных пробах, отобранных в 2023 г. на стадиях дефолирующих лесов, соответствуют региональным фоновым значениям. На стадии редколесья сохраняется превышение фоновых концентрации ($K_c = 1.9$), хотя отмечено уменьшение уровня загрязнения листьев по сравнению с предыдущими периодами исследования ($K_c = 9.5$ в 2005 г.; $K_c = 4.7$ в 2017 г.) Таким образом, за исследуемый период (1993-2023 гг.) произошло снижение концентрации Ni и Cu в сосновых и еловых лесах. Наибо-

лее очевидные изменения отмечены вблизи источника загрязнения, в техногенных редколесьях.

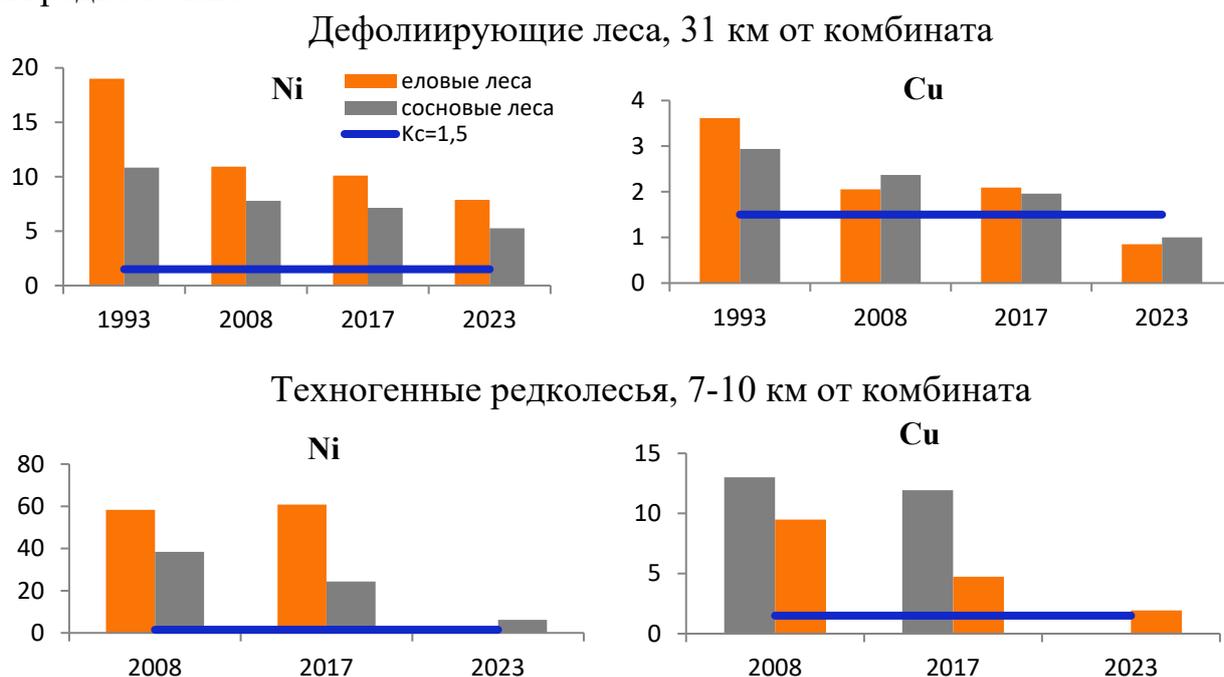
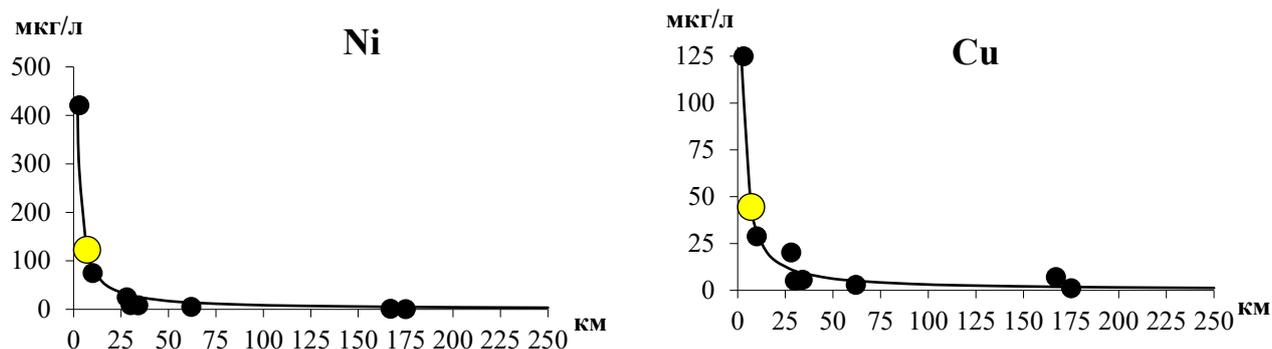


Рис. 3. Коэффициенты концентрации для Ni и Cu в листьях березы еловых и сосновых лесов на стадии дефолирующих лесов и едколесий в разные периоды исследований

Численная реконструкция полей регионального загрязнения снежного покрова и *Betula pubescens*. Для проведения численного анализа использовались результаты мониторинговых исследований загрязнения снега водорастворёнными фракциями меди и никеля в 2000-х гг. и малопараметрическая модель оценивания регионального загрязнения [16]. Для определения параметров модели в качестве опорной использовалась площадка, находящаяся в 7 км от промышленного предприятия (рис. 4). Данные измерений на остальных ППН позволили определить уровни соответствия с численно восстановленными концентрациями. Следует отметить систематическое превышение восстановленных концентраций над измеренными в средней и дальней зонах наблюдения, что может быть связано с проявлением процессов трансформации. В целом же, имеет место вполне удовлетворительное согласие. Полученные количественные закономерности указывают на возможность создания экономичных систем мониторинга. Аналогичный подход был использован и при оценивании содержания тяжёлых металлов в листьях берёзы. В этом случае ситуация более однозначная, поскольку, в отличие от снега, проводился анализ валового содержания металлов в листьях. Это повышает точность оценивания, позволяет надёжнее выявлять появление дополнительных источников.

Атмосферные выпадения (в виде снега)



Betula pubescens, листья

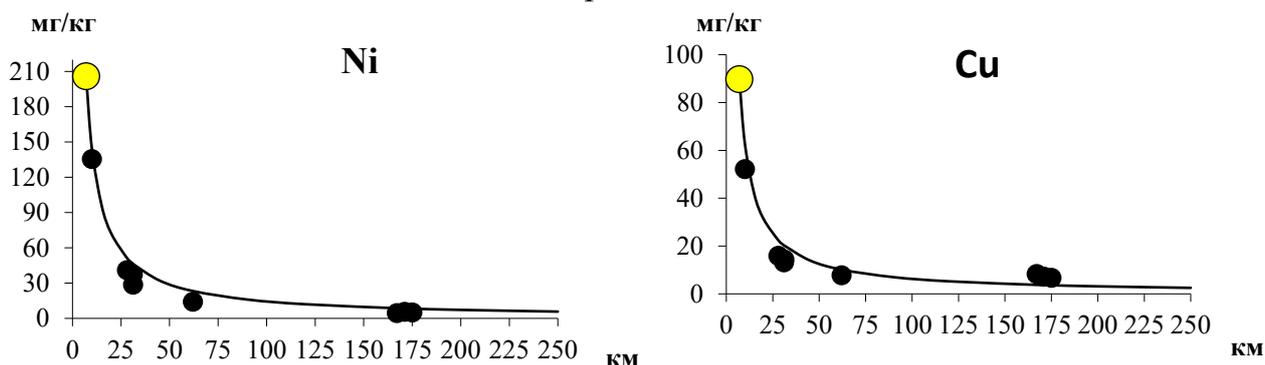


Рис. 4. Измеренные и численно восстановленные по региональной модели содержания Ni и Cu в снеговых и растительных пробах на площадках постоянного наблюдения. *Примечание:* жёлтый кружок – опорная точка измерения, чёрные кружочки (контроль) – результаты измерений на остальных пробных площадях, непрерывная линия – оценивание по модели

Заключение

Результаты исследований лесных экосистем в зоне воздействия медно-никелевого комбината «Североникель» показали, что концентрации Ni, Cu, SO_4^{2-} в снежном покрове и Ni, Cu в листьях березы превышают значения регионального фона. Высокие концентрации поллютантов в исследуемых компонентах лесных экосистем связаны с повышенным содержанием их в воздухе и почве, поскольку обследованная территория полностью попадает под влияние атмосферных выбросов комбината. Концентрации Ni, Cu, как правило, выше в подкروновых пространствах, по сравнению с межкروновыми и в еловых лесах по сравнению с сосновыми. Анализ многолетней динамики состава атмосферных выпадений в виде снега показал значительную вариабельность, при этом можно наблюдать снижение концентраций Cu и SO_4^{2-} в дефолирующих еловых и сосновых лесах, что может указывать на постепенное снижение аэротехногенной нагрузки.

Выявлены аномально высокие концентрации Ni в фотосинтезирующих органах березы в условиях атмосферного загрязнения, в том числе на значительном расстоянии от источников выбросов. В связи с сокращением выбросов в период

с 1993 по 2023 гг. произошло снижение Ni в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях, но значительные превышения фоновых концентраций сохраняются. Содержание Cu в листьях берёзы в 2023 г. стало соответствовать уровню природного варьирования в дефолирующих лесах, на стадии техногенных редколесий сохраняется превышение фоновых значений.

Применение модели малопараметрической реконструкции полей регионального загрязнения снежного покрова и *Betula pubescens* показало вполне удовлетворительное согласие восстановленных и измеренных концентраций в средней и дальней зонах мониторинга, что может быть использовано для восстановления пространственной картины загрязнения и планирования размещения дополнительных площадок наблюдения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИППЭС КНЦ РАН № 1021051803679-9 и темы Госзадания для ИВМиМГ FWNM – 2022 – 0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Раткин Н. Е., Асминг В. Э., Кошкин В. В. Влияние природных локальных факторов на загрязнение снежного покрова (на примере Печенгского района) // Вестник МГТУ. – 1988. – Т. 1. – № 3. – С. 151–160.
2. Никонов, В. В., Лукина Н. В. Влияние ели и сосны на кислотность и состав атмосферных выпадений в северо-таежных лесах индустриально развитого региона // Экология. – 2000. – № 2. – С. 97–105
3. De Vries W., Dobbertin M. H., Solberg S., van Dobben H. F., Schaub M. Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather condition on forest ecosystem in Europe: an overview // Plant and Soil. – 2014. – V. 380. – P. 1–45.
4. Ershov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Zukert N. V. Dynamics of snowmelt water composition in conifer forests exposed to airborne industrial pollution // Russian Journal of Ecology. – 2016. – V. 47. – No.1. – P. 46–52.
5. Воробьевская Е. Л., Евсеев А. В., Седова Н. Б., Слипечук М. В. Состояние природной среды в зоне влияния медно-никелевого комбината «Североникель» // Экология промышленного производства. – 2023. – № 2 (122). – С. 53–58.
6. Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги – Апатиты: Изд-во Кол. науч. центра РАН, 1998. – 316 с.
7. Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. – М.: Наука, 2005. – 245 с.
8. Лянгузова И. В., Беляева А. И., Катаева М. Н., Волкова Е. Н. Запасы потенциально токсичных элементов в почвенном покрове сосновых лесов северной тайги при аэротехногенном загрязнении // Ботанический журнал. – 2023. – Т. 108. – № 11. – С. 1001-1014.
9. Сухарева Т. А., Ершов В. В., Исаева Л. Г., Шкондин М. А. Оценка состояния северотаежных лесов в условиях снижения атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» // Цветные металлы. – 2020. – № 8. – С. 33 – 41.
10. Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Ivanova E. and Urbanavichus G. Pollution-induced changes in the composition of atmospheric deposition and soil waters in coniferous forests at the northern tree line // Sustainability. - 2022. - Vol. 14. – P. 15580.
11. Myking T., Aarrestad P. A., Derome J. et al. Effects of air pollution from a nickel–copper industrial complex on boreal forest vegetation in the joint Russian–Norwegian–Finnish border area. – Boreal Environ. Res. – 2009. – V.14. – P. 279–291.

12. Kashulina G., de Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis. – *Atmospheric Environ.* – 2014. – V. 89. – P. 672–682.
13. 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.
14. Сухарева Т. А., Иванова Е. А., Ершов В. В., Зенкова И. В., Корнейкова М. А., Штабровская И. М., Сошина А. С. Содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области // *Вопросы лесной науки.* – 2023. – Т. 6. – № 2. – Статья № 125.
15. Геохимия окружающей среды / Под ред. Ю.Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янина и др. – М.: Недра, 1990. – 334 с.
16. Рапута В. Ф., Олькин С. Е., Резникова И. К. Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником // *Оптика атмосферы и океана.* – 2008. – Т. 21. – № 6. – С. 558-562.

© Т. А. Сухарева, В. В. Ершов, В. Ф. Рапута, 2024