
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 630*2:582.475:504.5(470.21)

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И СЕРЫ
В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
КОМБИНАТА “ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ” В СВЯЗИ С ПРЕКРАЩЕНИЕМ
АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ¹

© 2025 г. Т. А. Сухарева*, В. В. Ершов, Е. А. Иванова

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН,
мкр. Академгородок, д. 14а, Апатиты, Мурманская область, 184209 Россия

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

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 04.10.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

Актуальность исследования определяется необходимостью оценки состояния лесных экосистем в условиях меняющейся техногенной нагрузки и практической значимостью совершенствования системы мониторинга для устойчивого управления лесами. Исследована динамика поступления поллютантов с атмосферными выпадениями, их аккумуляция в почве и древесном ярусе (на примере эдификаторного вида – сосны обыкновенной) в условиях воздействия комбината “Печенганикель” (пгт Никель, Мурманская область). Исследования проводили с 1991 по 2022 г. на пробных площадях постоянного наблюдения, расположенных в сосновых лесах на различном удалении от источника загрязнения (7, 14, 44 км). В период с 1991 по 2020 г. годовые объемы выбросов SO₂, Ni и Cu комбинатом постепенно снижались, а в декабре 2020 г. поступление в атмосферу выбросов поллютантов практически прекратилось в связи с закрытием плавильного цеха комбината “Печенганикель”. В первую очередь резкое сокращение выбросов поллютантов в атмосферу привело к изменению состава снеговых и дождевых вод, концентрации поллютантов (Ni, Cu, Co, Pb и Cd) в них приблизились к региональным фоновым значениям. Однако концентрации тяжелых металлов и серы в почве все еще значительно выше, чем в репрезентативных лесных экосистемах Мурманской области, что обусловлено длительным периодом, необходимым для восстановления и самоочищения почв.

Ключевые слова: атмосферные выпадения, почвы, сосна обыкновенная, атмосферное загрязнение, тяжелые металлы, северотаежные леса, Арктика.

DOI: 10.31857/S0024114825010094 EDN: DRPYEC

Мурманская область – один из наиболее индустриально развитых районов российской Арктики, принадлежащих к регионам России, лесные экосистемы которых наиболее чувствительны к загрязнению окружающей среды. Специфика функционирования экосистем определяется, с одной стороны, природно-климатическими условиями региона, с другой – уровнем антропогенной нагрузки. Основными источниками выбросов в атмосферу подкисляющих веществ и соединений тяжелых металлов в регионе являются предприятия АО “Кольская

горно-металлургическая компания” (комбинаты “Североникель” и “Печенганикель”), деятельность которых вызвала деградацию лесных экосистем на значительных по площади территориях. Следствием длительного техногенного загрязнения со стороны промышленных предприятий стало накопление тяжелых металлов в различных компонентах наземных и водных экосистем (Лукина, Никонов, 1996; Kashulina et al., 2014; Лянгузова и др., 2015; Копчик и др., 2016; Даувальтер, Кашулин, 2018). Работы по изучению состояния экосистем при воздействии атмосферных выбросов промышленных предприятий ведутся многими отечественными и зарубежными учеными, в том числе в условиях снижения техногенной нагрузки (Chernen'kova

¹Работа выполнена в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН.

et al., 2014; Vorobeichik et al., 2014; Hale, Robertson, 2016; Kowalska et al., 2016; Шергина и др., 2018; Zakrzewska, Klimek, 2018; Михайлова, 2020; Воробейчик, 2022). Но недостаточно сведений, позволяющих оценить реакцию лесных экосистем и их компонентов на снижение техногенной нагрузки в связи с закрытием промышленного объекта.

На протяжении более 80 лет (с 1940 г.) на северо-западе области функционирует медно-никелевый комбинат “Печенганикель” (пгт Никель, г. Заполярный) – источник диоксида серы и полиметаллической пыли, содержащей тяжелые цветные металлы (Ni, Cu, Co, Cd, Pb и др.). Исследования лесных экосистем в зоне воздействия комбината свидетельствуют о значительном накоплении поллютантов в почвах, растениях, изменении биогеохимических циклов элементов, жизненного состояния древостоев (Current..., 2008; Кольская..., 2012; Евдокимова и др., 2014; Исаева, Сухарева, 2021). В декабре 2020 г. произошло уникальное по своей значимости событие – закрытие плавильного цеха (пгт Никель), вследствие чего резко снизились выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. В этой связи изучение современного состояния северотаежных лесов в зоне продолжительного техногенного воздействия в начальный период после сокращения атмосферных выбросов является особенно важным для оценки состояния лесных экосистем, прогнозирования динамики биогеохимических циклов и устойчивого функционирования лесов, сравнение уровня выпадений загрязняющих веществ с атмосферными осадками с уровнем, рассматриваемым как критический для лесных экосистем.

Цель исследования – анализ динамики (1991–2022 гг.) содержания тяжелых металлов и серы в атмосферных выпадениях и почвенно-растительном покрове сосновых лесов в зоне воздействия атмосферных выбросов комбината “Печенганикель” (Мурманская область).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили на северо-западе Мурманской области, в подзоне северной тайги, в период с 1991 по 2022 г. на пробных площадях постоянного наблюдения (ППН), расположенных по градиенту загрязнения от комбината “Печенганикель” в 7, 14, 44 км. Пробные площади заложены в рамках проекта The Lapland Forest Damage Project (1990–1995 гг.), в котором участвовали сотрудники Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН и Лесного исследовательского института Финляндии. В процессе этих исследований была создана мониторинговая сеть площадок от пгт Никель к Финляндии по трем трансектам (Лукина, Никонов, 1993, 1996). В данной работе представлены результаты

с пробных площадей, находящихся на территории РФ и расположенных в юго-западном направлении от комбината.

Основным типом растительности в районе исследования являются сосняки лишайниково-кустарничковые в автоморфных позициях ландшафта на иллювиально-железистых подзолах (Rustic Podzols, WRB 2022) с типичным для них профилем: О–Е–ВН (BF, BH)–С. В древесном ярусе преобладает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), возраст которой варьирует от 80 до 260 лет. В напочвенном покрове доминируют кустарнички – черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.), водяника гермафролитная (*Empetrum hermafroditum* Hager.) и лишайник кладония звездчатая (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar&Vezda). Фоновая территория расположена на значительном удалении от источника загрязнения (275 км) на юго-западе Мурманской области в сосняке лишайниково-кустарничковом и представлена 2 стационарными пробными площадями, которые отражают региональный фон и соответствуют всем международным критериям контрольных площадок (UNECE ICP Forests Programme..., 2020).

Закрытие плавильного цеха комбината “Печенганикель” в декабре 2020 г. способствовало существенному сокращению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями АО “Кольская ГМК” (Сухарева и др., 2020; Годовой отчет..., 2021 г.). По информации АО “Кольская ГМК”, предоставленной ИППЭС КНЦ РАН, в исследуемый период годовые объемы выбросов SO₂ комбинатом “Печенганикель” снижались от 257.5 тыс. т в 1991 г. до 0.1 тыс. т в 2022 г. (рис. 1). Годовые объемы выбросов Ni и Cu в 1991 г. составляли 279 и 171 тонну, в 2022 г. – 2.1 и 0.5 тонны соответственно.

Отбор атмосферных выпадений в виде снега выполняли в 2004, 2005, 2021 и 2022 гг., дождя – в 2004, 2005 и 2021 гг. Отбор снега проводили из ненарушенной стенки траншеи с помощью пластикового коллектора в период максимального снегонакопления (конец марта – начало апреля) под пологом леса и на открытой территории в трехкратной повторности. На каждой пробной площади для сбора дождевых вод использовали 15 осадкоприемников (12 – под пологом леса, 3 – на открытой территории), отбор проводили ежемесячно в период с июня по октябрь с измерением объема осадков в каждом приемнике и отбором на анализ одной смешанной пробы. Выпадения основных поллютантов с атмосферными осадками рассчитывали с учетом среднегодовой концентрации и среднегодового объема пробы.

Отбор почвенных образцов проводили в 2004, 2011, 2019, 2021 гг. на ППН в 3–5-кратной

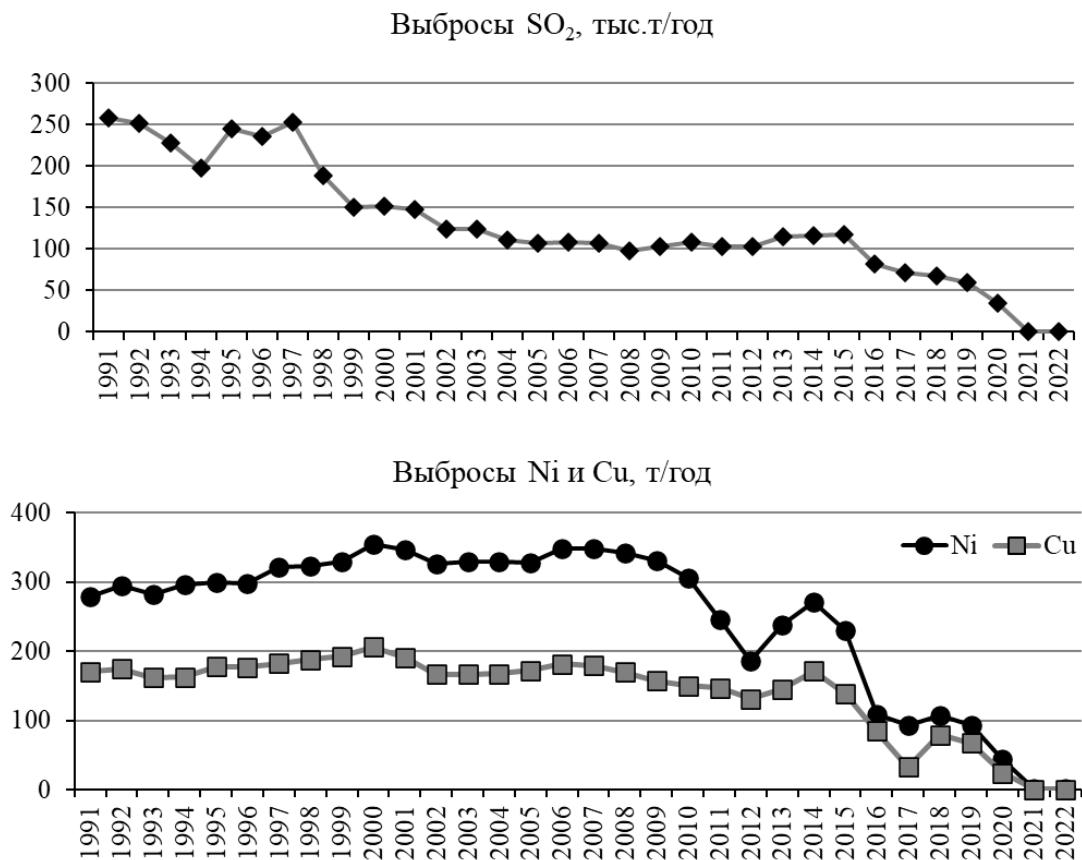


Рис. 1. Выбросы в атмосферу SO_2 , Ni, Cu комбинатом “Печенганикель” (по данным АО “Кольская ГМК” за период 1991–2022 гг.).

повторности в конце периода вегетации (август). Образцы отбирали по почвенным горизонтам: подстилка/органогенный горизонт (OL, OF, OH), элювиальный горизонт (E), иллювиальный горизонт (B) и почвообразующая порода (C). Почвенные образцы просеивали через сито с отверстиями размером 1 мм.

Отбор хвои сосны обыкновенной проводили в 1991, 2004, 2011, 2019 гг. из верхней трети кроны в 5–15-кратной повторности в конце вегетационного периода (август). В лаборатории ее разделяли на хвою текущего года, однолетнюю и многолетнюю. На всех исследованных ППН предельный возраст многолетней хвои сосны составлял 4–6 лет.

Актуальную кислотность (pH) в почвенных образцах в водной суспензии определяли при соотношении почва : раствор 1 : 25 – для органогенных и 1 : 1.25 – для минеральных горизонтов. Для определения концентрации подвижных форм соединений элементов почвенные образцы обрабатывали 1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ($\text{pH} = 4.65$) (Methods..., 1989). Использовали те же соотношения почвы и вытеснителя, что и при определении pH . Концентрации химических элементов в хвои определяли после

разложения концентрированной HNO_3 (мокрое золение).

Актуальную кислотность (pH водной вытяжки) проб снега, дождевой воды и почв измеряли потенциометрически. Концентрации металлов (Cu, Ni, Pb, Cd, Cr, Co) во всех пробах определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии; S в почвах и растениях – турбидиметрическим методом, SO_4^{2-} в снеговой и дождевой воде – методом ионообменной хроматографии. Аналитические исследования проведены в Центре коллективного пользования физико-химических методов анализа Института проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр”.

Всего за период исследования (1991–2022 гг.) проанализировано 754 образцов, из них 249 – атмосферные выпадения, 235 – почвы, 270 – хвоя сосны.

Полученные данные обрабатывали статистическими методами с помощью программного обеспечения MS Excel (описательная статистика) и Statistica 13.3 (U -критерий Манна–Уитни).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Атмосферные выпадения в виде снега.

В период интенсивной работы комбината (2004–2005 гг.) на ППН в 7 и 14 км от комбината наблюдалось достоверное ($p < 0.05$) повышение в снеговых водах концентраций Ni (до 19.5 раз), Cu (до 12 раз) и Co (до 7 раз) по сравнению с ППН в 44 км как под пологом леса, так и на открытой территории (табл. 1). Кислотность на ППН в 44 км выше, чем на ППН, расположенных в 7 и 14 км. При этом в 44 км от источника загрязнения в снеге под пологом леса концентрации Ni, Cu, Co, Pb и Cr (от 2 до 15 раз) и SO_4^{2-} (до 5 раз) достоверно ($p < 0.05$) возрастили по сравнению с фоновой территорией. На ППН, расположенных в 14 и 7 км от комбината, концентрации тяжелых металлов под пологом леса увеличиваются для Co, Cd, Pb, Cr – от 2 до 12 раз, а для Cu и Ni – в 66 и 185 раз, для сульфатов – до 4 раз по сравнению с фоном, что свидетельствует о существенной техногенной нагрузке на лесные экосистемы, оказываемой комбинатом за данный период. На всех исследуемых ППН наблюдалось повышение кислотности по сравнению с фоновыми значениями.

В период резкого снижения выбросов (2021–2022 гг.) на всех изученных ППН на открытой территории обнаруживается достоверное увеличение концентрации SO_4^{2-} (до 3 раз) относительно значений регионального фона (табл. 1). На ППН в 7 км от комбината под пологом леса наблюдается ($p < 0.05$) повышение в снеговых водах концентраций Co и Cd (до 6 и 2 раз соответственно) по сравнению с ППН в 44 км от источника загрязнения. Концентрации сульфатов на ППН в 14 км от источника загрязнения под пологом леса в 1.5 раза достоверно ($p < 0.05$) выше, чем на открытой территории.

Сравнивая период закрытия комбината с периодом его активной работы (2021–2022 гг.), следует отметить достоверное ($p < 0.05$) снижение концентраций тяжелых металлов в снеге как под пологом леса, так и на открытой территории. В 2021–2022 гг. на ППН, в 44 км от источника загрязнения, концентрации Ni, Cu, Co, Cd, Pb и Cr уменьшились от 2 до 47 раз, в 14 и 7 км – от 3 до 80 раз по сравнению с 2004–2005 гг. На всех исследованных ППН выявлено снижение кислотности снеговых вод. Это свидетельствует об уменьшении техногенной нагрузки на лесные экосистемы после закрытия плавильного цеха комбината.

Атмосферные выпадения в виде дождя. В условиях атмосферного загрязнения (2004–2005 гг.) в дождевых водах, по сравнению с фоновой территорией, достоверно ($p < 0.05$) увеличиваются концентрации Ni (до 4 раз) в 44 км от комбината, Ni, Cu, Co, Cd, Pb (от 2 до 50 раз) и SO_4^{2-} (от 1.5 до 2 раз) в 7 и 14 км от источника загрязнения

(табл. 2). Значимые различия ($p < 0.05$) отмечены для Cu, Ni и SO_4^{2-} под пологом леса в 44 км от комбината; здесь концентрации в 2 раза выше, чем на открытой территории. Выявленная закономерность свидетельствует о смыте и выщелачивании элементов из крон древесных растений (Лукина, Никонов, 1996; De Vries et al., 2014; Ershov et al., 2020). При приближении к источнику атмосферного загрязнения (ППН в 7 и 14 км) наблюдается достоверное ($p < 0.05$) увеличение концентраций Ni, Cu, Co, Cd, Pb под пологом леса и на открытой территории по сравнению с ППН в 44 км. На открытой территории также выявлено увеличение концентрации SO_4^{2-} (7 км от комбината) по сравнению с ППН, расположенной в 44 от комбината.

В 2021 г. по градиенту атмосферного загрязнения выявлено достоверное снижение показателя pH по сравнению с фоновой территорией. Следует отметить, что на ППН, расположенной в 7 км от комбината, концентрации Ni и Cu в дождевых водах под пологом леса все еще выше (3 и 4 раза соответственно), чем на фоновой территории. На ППН в 7, 14 и 44 км от комбината в атмосферных выпадениях под пологом леса концентрации SO_4^{2-} и Ni достоверно ($p < 0.05$) выше, чем на открытой территории. Кроме того, в дождевых водах в 7 км наблюдается достоверное увеличение концентрации Ni (до 3 раз) под пологом леса по сравнению с ППН в 44 км.

Сравнение периода закрытия комбината с периодом его активной работы показало снижение ($p < 0.05$) концентраций тяжелых металлов в дожде: в 44 км от комбината концентрации Co под пологом леса уменьшились в 23 раза, концентрации Ni и Pb на открытой территории – в 28 раз. Как под пологом леса, так и на открытой территории на ППН в 14 км концентрации Ni, Cu, Co, Pb и Cd снизились от 7 до 62 раз, в 7 км – от 6 до 68 раз. Как и в снеговых водах, существенное снижение концентраций тяжелых металлов в дожде свидетельствует о снижении техногенной нагрузки на лесные экосистемы после закрытия плавильного цеха комбината.

Информация о химическом составе атмосферных выпадений имеет большое индикаторное значение для оценки возможных негативных воздействий на леса. Более четверти века развивается концепция критических нагрузок на леса, которые определяются как “количественная оценка воздействия уровня одного или нескольких поллютантов, ниже которого значительных негативных последствий для наиболее чувствительных компонентов экосистем не наблюдается, в соответствии с современным уровнем знаний” (Копчик, 2004; Critical loads..., 2004; Koptsiuk et al., 2007). Критические нагрузки (critical loads) рассчитываются с использованием химических индикаторов, определяющих вредное воздействие и пороговые значения. Для

Таблица 1. Концентрации Ni, Cu, SO₄²⁻ (мг/л), Co, Pb, Cd, Cr (мкг/л) и pH в снеговых водах на ППН, расположенных на различном удалении от комбината “Печенганикель”

Периоды, гг.	Позиция	pH	Ni	Cu	SO ₄ ²⁻	Co	Cd	Pb	Cr
Фоновая территория 275 км									
	Под пологом	4.83 0.05	0.0002 0.0001	0.001 0.0001	0.43 0.07	0.07 0.02	0.08 0.02	0.12 0.03	0.10 0.01
	Открытая								
44 км									
2004–2005	Под пологом	4.41 0.09	0.003 0.001	0.007 0.002	2.22 1.13	0.16 0.06	0.04 0.01	0.90 0.20	0.37 0.08
	Открытая	4.47 0.08	0.002 0.001	0.006 0.002	1.30 0.50	0.13 0.03	0.04 0.01	0.94 0.24	0.37 0.09
	14 км								
	Под пологом	4.56 0.08	0.037 0.020	0.066 0.031	1.78 0.33	0.87 0.35	0.18 0.07	1.48 0.34	0.30 0.09
	Открытая	4.62 0.07	0.034 0.018	0.072 0.036	1.51 0.17	0.89 0.45	0.18 0.09	1.66 0.37	0.38 0.11
7 км									
	Под пологом	4.59 0.10	0.036 0.014	0.048 0.017	1.68 0.40	0.76 0.26	0.09 0.02	1.57 0.53	0.40 0.06
	Открытая	4.59 0.10	0.039 0.015	0.054 0.022	1.75 0.43	0.71 0.30	0.10 0.03	1.49 0.47	0.35 0.07
	Фоновая территория 275 км								
	Под пологом	5.24 0.08	0.003 0.001	0.0004 0.0002	1.64 0.89	0.01 0.003	0.01 0.001	0.04 0.01	0.08 0.02
2021–2022	Открытая	5.46 0.11	0.002 0.001	0.0004 0.0001	0.52 0.08	0.01 0.000	0.01 0.001	0.01 0.003	0.03 0.002
	44 км								
	Под пологом	5.72 0.21	0.001 0.000	0.001 0.0002	1.36 0.23	0.01 0.003	0.01 0.001	0.03 0.01	0.15 0.03
	Открытая	5.61 0.25	0.004 0.002	0.0004 0.0002	1.06 0.23	0.02 0.005	0.01 0.001	0.02 0.01	0.16 0.11
14 км									
	Под пологом	5.41 0.11	0.003 0.001	0.001 0.0003	1.49 0.13	0.03 0.01	0.01 0.001	0.04 0.01	0.06 0.01
	Открытая	5.56 0.21	0.002 0.001	0.002 0.001	1.01 0.11	0.03 0.01	0.01 0.003	0.02 0.01	0.05 0.01
	7 км								
	Под пологом	5.43 0.13	0.003 0.001	0.001 0.0004	1.50 0.10	0.06 0.04	0.02 0.003	0.02 0.01	0.11 0.04
	Открытая	5.52 0.20	0.013 0.008	0.001 0.0004	1.51 0.15	0.01 0.002	0.01 0.002	0.02 0.01	0.08 0.02

Примечание. Здесь и в табл. 2–4 в числителе – среднее значение, в знаменателе – стандартная ошибка.

Таблица 2. Концентрации Ni, Cu, SO₄²⁻ (мг/л), Co, Pb, Cd, Cr (мкг/л) и pH в дождевых водах на ППН, расположенных на различном удалении от комбината “Печенганикель”

Периоды, гг.	Позиция	pH	Ni	Cu	SO ₄ ²⁻	Co	Cd	Pb	Cr
Фоновая территория 275 км									
	Под пологом	4.75 0.21	0.001 0.0002	0.005 0.001	1.39 0.26	0.13 0.04	0.06 0.02	0.33 0.09	0.49 0.13
	Открытая								
44 км									
	Под пологом	4.72 0.32	0.004 0.001	0.004 0.001	2.53 0.53	0.24 0.02	0.03 0.01	0.30 0.04	0.19 0.04
	Открытая	4.61 0.11	0.002 0.0001	0.002 0.0002	0.97 0.10	0.18 0.07	0.01 0.00	0.29 0.06	0.13 0.03
14 км									
	Под пологом	4.75 0.13	0.021 0.005	0.020 0.006	2.22 0.45	0.55 0.14	0.14 0.04	0.83 0.14	0.28 0.04
	Открытая	4.66 0.10	0.011 0.004	0.015 0.005	1.25 0.30	0.28 0.10	0.07 0.02	0.69 0.17	0.28 0.06
7 км									
	Под пологом	4.62 0.22	0.052 0.008	0.052 0.013	2.71 0.35	1.39 0.19	0.16 0.03	0.68 0.16	0.34 0.05
	Открытая	4.70 0.31	0.031 0.006	0.032 0.008	1.82 0.33	0.79 0.09	0.07 0.02	0.46 0.11	0.29 0.07
Фоновая территория 275 км									
	Под пологом	5.64 0.16	0.002 0.001	0.002 0.001	1.46 0.27	0.25 0.06	0.03 0.01	0.22 0.08	0.19 0.04
	Открытая	6.32 0.08	0.001 0.001	0.002 0.001	1.17 0.39	0.14 0.06	0.01 0.002	0.10 0.05	0.14 0.06
44 км									
	Под пологом	4.74 0.17	0.002 0.001	0.004 0.002	2.00 0.38	0.01 0.00	0.02 0.01	0.22 0.08	0.17 0.04
	Открытая	5.09 0.05	0.0002 0.0001	0.004 0.002	0.94 0.13	0.02 0.01	0.01 0.0001	0.01 0.00	0.32 0.15
14 км									
	Под пологом	4.77 0.09	0.002 0.001	0.003 0.001	1.27 0.09	0.03 0.01	0.01 0.00	0.01 0.00	0.28 0.10
	Открытая	5.20 0.05	0.000 0.000	0.001 0.001	0.83 0.14	0.01 0.004	0.01 0.001	0.02 0.01	0.49 0.16
7 км									
	Под пологом	4.80 0.18	0.006 0.002	0.008 0.002	1.73 0.22	0.08 0.05	0.01 0.00	0.11 0.07	0.70 0.28
	Открытая	5.13 0.06	0.0004 0.0002	0.004 0.002	0.91 0.06	0.03 0.01	0.01 0.002	0.20 0.19	0.20 0.06

атмосферных выпадений могут рассчитывать критическую нагрузку для определенного элемента, например, для сульфатной серы (Korhola et al., 1999) или тяжелых металлов (Reinds et al., 2006). Из приведенных выше результатов исследований установлено, что концентрации тяжелых металлов и серы в атмосферных выпадениях на ППН в 7 и 14 км от источника загрязнения значительно превышают фоновые значения, особенно в период активной работы плавильного цеха комбината (2004–2005 гг.). Поэтому целесообразно сравнить уровни выпадений поллютантов на объектах представленных исследований с установленным в международной практике уровнем критических нагрузок.

На всех исследуемых ППН уровень критических нагрузок общих выпадений (с дождем и снегом) S-SO_4^{2-} , Pb, Cd и Cr не был превышен (Korhola et al., 1999; Reinds et al., 2006, 2008) как в период активной деятельности комбината, так и после закрытия плавильного цеха. Уровень критической нагрузки для экосистем Центральной Лапландии по Ni и Cu составляет 120 и 5 г/га в год соответственно (Reinds et al., 2006). Выпадения Ni под пологом леса и на открытой территории превышали

уровень критических нагрузок только в период активной работы комбината в 7 км от источника загрязнения (в 1.5 раза) (рис. 2). Выпадения Cu под пологом леса и на открытой территории в период интенсивной деятельности комбината превышали уровень критических нагрузок для фоновой территории – до 2 раз, в 44 км – до 4 раз, в 14 и 7 км – до 40 раз. После закрытия плавильного цеха выпадения Cu на фоновой территории не превышают уровня критических нагрузок, на ППН в 44 км превышение составляет до 2 раз, в 14 и 7 км – до 4 раз как под пологом леса, так и на открытой территории.

Почвы. Почвенный покров как наиболее консервативный компонент экосистемы определяет ее состояние и устойчивость, играет важную роль в формировании, поддержании и сохранении биологического разнообразия (Федорец и др., 2015; World Reference Base..., 2022). Функционирование северотаежных лесов во многом определяется условиями минерального питания растений, которые существенно изменяются в зоне воздействия крупных промышленных предприятий. Органогенный горизонт рассматривается как эффективный

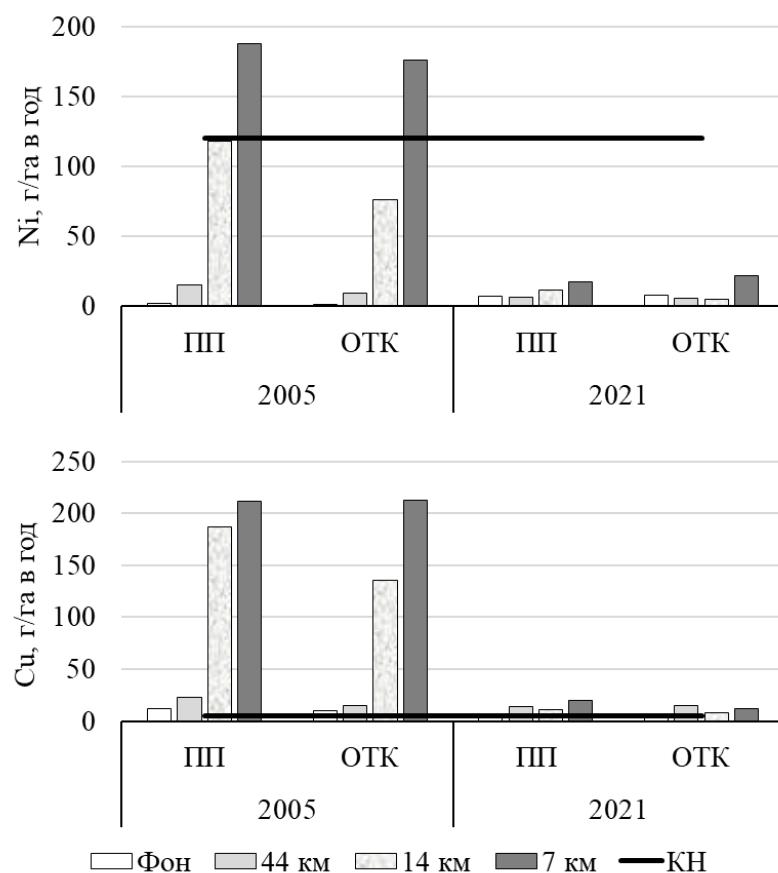


Рис. 2. Атмосферные выпадения никеля и меди в период активной деятельности комбината (2005 г.) и в период после его закрытия (2021 г.). ПП – под пологом леса; OTK – открытая территория; КН – уровень критической нагрузки (Reinds et al., 2006).

биогеохимический барьер для тяжелых металлов, поступающих в экосистемы в результате атмосферного загрязнения (Лукина, Никонов, 1996; Лянгутова и др., 2015; Копчик и др., 2016).

В ненарушенных лесах мощность органогенного горизонта варьирует от 7 до 12 см. Фоновые значения актуальной кислотности (pH) органогенных горизонтов характеризуются низкими значениями и изменяются в диапазоне от 3.7 до 4.0. Вниз по почвенному профилю, в минеральных горизонтах, величина pH возрастала, достигая максимальных значений (5.1–5.2) в почвообразующей породе (горизонт С). Максимальное содержание Ni, Cu, Cd, Pb наблюдалось в органогенном горизонте почв, концентрации Pb достоверно ($p < 0.05$) возрастали от подгоризонта OL к подгоризонту OH (табл. 3). В распределении Со по почвенному профилю отмечается 2 максимума – в органогенном (подгоризонт OH) и в иллювиальном (B) горизонтах.

В зоне воздействия комбината “Печенганикель”, на расстоянии в 44 км от источника загрязнения, мощность органогенного горизонта варьировала от 8 до 13 см и соответствовала природному варьированию. На расстоянии 7 и 14 км от комбината диапазон изменения мощности органогенного горизонта находился в пределах 5–9 см, что ниже фоновых значений.

В подгоризонтах OL, OF (44 км) и OL, OF, OH (7 км) отмечается возрастание величины pH по сравнению с региональным фоном, что подтверждает представление о нейтрализации кислотности в условиях загрязнения кислотообразующими веществами в результате протонирования растворимых и нерастворимых органических соединений и за счет быстрых катионообменных реакций (Соколова и др., 1996; Кислотные осадки..., 1999). Различия в кислотности минеральных горизонтов фоновых и нарушенных лесных биогеоценозов не выражены.

На всех ППН в районе воздействия комбината в 2021 г. выявлено многократное возрастание концентраций Ni, Cu, Со как в органогенных, так и минеральных горизонтах по сравнению с фоновыми значениями. В подстилке содержание большинства тяжелых металлов выше, чем в минеральных горизонтах. Максимальное накопление металлов отмечается на расстоянии 7 км от комбината: превышение фоновых значений по содержанию Ni в органогенном горизонте почв достигали 543–746 раз, в минеральных горизонтах – в 225 (горизонт E) и 14 (горизонт B) раз. Концентрации Cu превышали фоновый уровень в органогенном горизонте в 403–1075 раз, в минеральных горизонтах E и B – до 73 и 7 раз соответственно. В органогенном горизонте отмечена более высокая аккумуляция никеля по сравнению с медью, что связано с его значительным преобладанием в составе

выбросов на протяжении нескольких десятилетий, вплоть до 2015 г. Концентрация Со возрастала в органогенном горизонте – в 81–445 раз, горизонтах E и B – в 33 и 4 раза соответственно относительно фоновых значений. Достоверное увеличение содержания серы ($p < 0.05$) в подстилке выявлено только вблизи локального источника загрязнения (7 км от комбината). Результатами предыдущих исследований также было показано, что аэротехногенные выбросы являются основным источником повышенных концентраций в почве Ni, Cu, Со и других ТМ на расстоянии до 30–40 км от комбината. При этом наибольшие концентрации ТМ отмечены вблизи локального источника загрязнения на расстоянии до 10 км (Current..., 2008; Кольская..., 2012; Даувальтер, Кашулин, 2018).

На ППН в 44 км от комбината выявлено достоверное ($p < 0.05$) увеличение концентрации Pb в иллювиальном горизонте и почвообразующей породе в 2.6 раза по сравнению с фоновыми значениями, в 7 и 14 км в органогенных горизонтах – в 1.7–7.5 раза, в иллювиальном горизонте (горизонт B) – в 2.1–2.6 раза. Концентрации Cd в 7 и 14 км в органогенном и иллювиальном горизонтах в 1.6–2.6 раза превышают фоновые значения. В элювиальном горизонте (горизонт E) концентрации Pb сопоставимы с региональным фоном.

Исследование многолетней динамики содержания Cu, Ni (за период 2004–2021 гг.), Со, Cd, Pb (за период 2011–2021 гг.) показало, что на ППН, расположенной в 44 км от источника загрязнения, содержание ТМ в органогенном горизонте почв снижается ($p < 0.05$) (рис. 3). За это время наблюдалось достоверное ($p < 0.05$) снижение в почве концентраций Cu, Со, Pb на расстоянии 7 и 14 км. В почве сохраняются высокие концентрации Ni и Cd. В 2021 г. произошло увеличение содержания Ni (7 и 14 км) и Cd (14 км) по сравнению с предыдущим периодом исследования (2004 г.). За исследуемый период на всех ППН снизились концентрации S в почве, что обусловлено резким снижением поступления SO_2 в атмосферу.

Результаты наших исследований демонстрируют, что, несмотря на снижение содержания тяжелых металлов в почвах, их концентрации остаются существенно выше фоновых значений. Известно, что возможности полного самоочищения от тяжелых металлов весьма ограничены и при условии прекращения поступления в экосистемы от антропогенных источников период восстановления почвы оценивается в сотни лет (Яхнин и др., 1997; De Vries, Bunker, 1996). Это связано с высокой степенью закрепления тяжелых металлов в органогенном горизонте и низкой скоростью вымывания в минеральные горизонты (Динамика..., 2009).

Многолетние исследования на стационарных пробных площадях в районе воздействия

Таблица 3. Кислотность и подвижные формы химических элементов (мг/кг) в почве сосновых лесов на ППН, расположенных на разном удалении от комбината “Печенганикель”

Горизонт	Мощность, см	pH	Ni	Cu	S	Co	Cd	Pb
Фоновая территория 275 км*								
OL	<u>1.3</u> 0.3	<u>3.95</u> 0.02	<u>0.55</u> 0.04	<u>0.40</u> 0.10	<u>94</u> 4	<u>0.04</u> 0.003	<u>0.14</u> 0.02	<u>0.71</u> 0.21
OF	<u>4.0</u> 1.3	<u>3.88</u> 0.07	<u>0.74</u> 0.10	<u>0.38</u> 0.07	<u>101</u> 8	<u>0.11</u> 0.014	<u>0.22</u> 0.03	<u>4.32</u> 0.41
OH	<u>3.8</u> 0.5	<u>3.84</u> 0.04	<u>0.84</u> 0.10	<u>0.20</u> 0.03	<u>84</u> 9	<u>0.20</u> 0.04	<u>0.26</u> 0.03	<u>7.57</u> 0.82
E	<u>6.3</u> 1.4	<u>4.20</u> 0.06	<u>0.08</u> 0.03	<u>0.09</u> 0.02	<u>10</u> 1	<u>0.03</u> 0.004	<u>0.007</u> 0.001	<u>0.65</u> 0.04
B	<u>13.3</u> 2.0	<u>4.94</u> 0.03	<u>0.36</u> 0.03	<u>0.21</u> 0.04	<u>77</u> 6	<u>0.19</u> 0.06	<u>0.005</u> 0.001	<u>0.19</u> 0.03
C	—	<u>5.23</u> 0.05	<u>0.23</u> 0.02	<u>0.13</u> 0.03	<u>8</u> 3	<u>0.08</u> 0.05	<u>0.009</u> 0.007	<u>0.14</u> 0.008
44 км**								
OL	<u>2.3</u> 0.5	<u>4.41</u> 0.08	<u>11.8</u> 1.64	<u>2.06</u> 0.33	<u>126</u> 9	<u>0.63</u> 0.08	<u>0.08</u> 0.01	<u>0.58</u> 0.03
OF	<u>4.2</u> 0.7	<u>4.16</u> 0.07	<u>19.1</u> 2.35	<u>2.56</u> 0.54	<u>140</u> 15	<u>1.14</u> 0.12	<u>0.15</u> 0.02	<u>2.49</u> 0.68
OH	<u>4.7</u> 0.8	<u>3.80</u> 0.07	<u>18.7</u> 3.48	<u>4.24</u> 1.23	<u>119</u> 26	<u>1.20</u> 0.19	<u>0.16</u> 0.02	<u>4.82</u> 1.27
E	<u>6.0</u> 1.4	<u>4.12</u> 0.10	<u>1.47</u> 0.36	<u>0.45</u> 0.13	<u>10</u> 1	<u>0.16</u> 0.03	<u>0.01</u> 0.004	<u>0.68</u> 0.04
B	<u>15.7</u> 0.6	<u>4.92</u> 0.05	<u>1.40</u> 0.22	<u>2.97</u> 0.53	<u>49</u> 10	<u>0.24</u> 0.06	<u>0.005</u> 0.001	<u>0.49</u> 0.09
C		<u>5.31</u> 0.08	<u>0.69</u> 0.12	<u>5.19</u> 2.37	<u>21</u> 2	<u>0.21</u> 0.03	<u>0.003</u> 0.0002	<u>0.37</u> 0.05
14 км**								
OL	<u>1.4</u> 0.5	<u>4.07</u> 0.05	<u>135</u> 13	<u>41</u> 9	<u>131</u> 6	<u>4.60</u> 0.37	<u>0.25</u> 0.03	<u>2.83</u> 0.25
OF	<u>2.6</u> 0.3	<u>3.97</u> 0.04	<u>253</u> 15	<u>110</u> 15	<u>137</u> 6	<u>7.61</u> 0.43	<u>0.42</u> 0.03	<u>12.8</u> 1.33
OH	<u>2.5</u> 0,2	<u>3.89</u> 0.04	<u>205</u> 7	<u>78</u> 13	<u>133</u> 12	<u>6.97</u> 0.34	<u>0.47</u> 0.03	<u>13.9</u> 1.18
E	<u>6.2</u> 0.9	<u>4.17</u> 0.07	<u>4.03</u> 0.99	<u>1.97</u> 0.49	<u>5</u> 1	<u>0.16</u> 0,02	<u>0.008</u> 0.002	<u>0.68</u> 0.07
B	<u>13.0</u> 0.5	<u>4.95</u> 0.09	<u>3.91</u> 1.15	<u>0.53</u> 0.19	<u>77</u> 7	<u>0.67</u> 0.11	<u>0.008</u> 0.002	<u>0.49</u> 0.05

Таблица 3. Окончание

Горизонт	Мощность, см	pH	Ni	Cu	S	Co	Cd	Pb
C	—	<u>5.38</u> 0.07	<u>1.06</u> 0.19	<u>0.34</u> 0.13	<u>28</u> 3	<u>0.74</u> 0.16	<u>0.004</u> 0.001	<u>0.30</u> 0.01
7 км**								
OL	<u>2.0</u> 0.4	<u>4.34</u> 0.05	<u>410</u> 33	<u>161</u> 24	<u>173</u> 11	<u>17.8</u> 1.48	<u>0.37</u> 0.04	<u>5.29</u> 0.62
OF	<u>3.5</u> 0.5	<u>4.34</u> 0,05	<u>539</u> 27	<u>250</u> 31	<u>168</u> 6	<u>20.31</u> 0.57	<u>0.46</u> 0.03	<u>10.1</u> 0.66
OH	<u>3.0</u> 0,3	<u>4.29</u> 0.05	<u>456</u> 30	<u>215</u> 28	<u>150</u> 6	<u>16.23</u> 1.295	<u>0.54</u> 0.07	<u>12.9</u> 1.34
E	<u>3.7</u> 0.2	<u>4.44</u> 0.07	<u>18</u> 3.4	<u>6.98</u> 1.32	<u>15</u> 3	<u>0.995</u> 0.17	<u>0.02</u> 0.005	<u>0.53</u> 0.05
B	<u>14.2</u> 1.2	<u>4.90</u> 0.04	<u>5.06</u> 0.87	<u>1.56</u> 0.23	<u>45</u> 10	<u>0.80</u> 0.20	<u>0.008</u> 0.002	<u>0.39</u> 0,05
C	—	<u>5.23</u> 0.07	<u>3.14</u> 0.60	<u>1.11</u> 0.38	<u>23</u> 11	<u>0.76</u> 0.18	<u>0.006</u> 0.002	<u>0.44</u> 0.09

Примечание. * – данные 2019 г.; ** – данные 2021 г.

Среднеуральского медеплавильного завода также свидетельствуют об отсутствии ярко выраженного выноса металлов из почвы в разрезе небольшого временного отрезка в 20 лет (Воробейчик, Кайгородова, 2017). В нашем случае сравнение динамики приоритетных загрязнителей в составе выбросов среди ТМ (никель и медь) показало, что за исследуемый период в почве у локального источника загрязнения концентрации меди снизились, а никеля – даже возросли. Это может быть обусловлено тем, что никель длительный период активной работы комбината “Печенганикель” являлся преобладающим компонентом атмосферных выбросов и в большей степени накапливался в лесных экосистемах (почва, фитомасса).

Сосна обыкновенная. Сведения о содержании тяжелых металлов в фотосинтезирующих органах имеют высокое индикационное значение для оценки негативных воздействий на экосистемы и используются для мониторинга состояния лесов в индустриальных развитых регионах (Копчик и др., 2016; Шергина и др., 2018). В условиях атмосферного загрязнения поллютанты поступают в растение вследствие корневого и фолиарного поглощения, при этом почва является важнейшим источником тяжелых металлов.

По данным 1991–2019 гг., фоновое содержание Ni в хвое сосны варьирует от 0.3 до 3.3, Cu – от 1.8

до 4.4, Co – от 0.02 до 0.12, Cd – от 0.02 до 0.07, Pb – от 0.01 до 0.14 мг/кг. Максимальные концентрации Ni и Cu отмечены в хвое текущего года, Co и Pb – в многолетней хвое. Концентрации S в хвое сосны фонового района изменяются от 408 до 1040 мг/кг.

Согласно данным 2019 г., превышение фоновых концентраций Ni, Cu, Co, Pb ($p < 0.05$) в хвое сосны наблюдалось на всех ППН в зоне воздействия комбината “Печенганикель” (табл. 4, рис. 4). Выявлено нарушение природных закономерностей распределения Ni и Cu по возрастным классам хвои. Вблизи источника загрязнения (7 км от комбината) максимальное накопление Ni и Cu отмечено в однолетней и многолетней хвое ($p < 0.05$). Содержание Ni здесь превышают фоновые показатели в хвое текущего года – в 12–16 раз, в однолетней и многолетней хвое – в 58–76 раза, содержание Cu – в 2–4 раза и 13–19 раз соответственно. На ППН, расположенной в 44 км от комбината, достоверных изменений концентрации никеля и меди в хвое в зависимости от возраста не обнаружено. Но здесь также отмечено увеличение концентрации: Ni – в 6–14 раз, Cu – в 2–4 раза по сравнению с фоновыми значениями. При аэротехногенном воздействии в ассимилирующих органах сосны сохраняются возрастные особенности распределения Co и Pb, концентрации которых выше в многолетней хвое

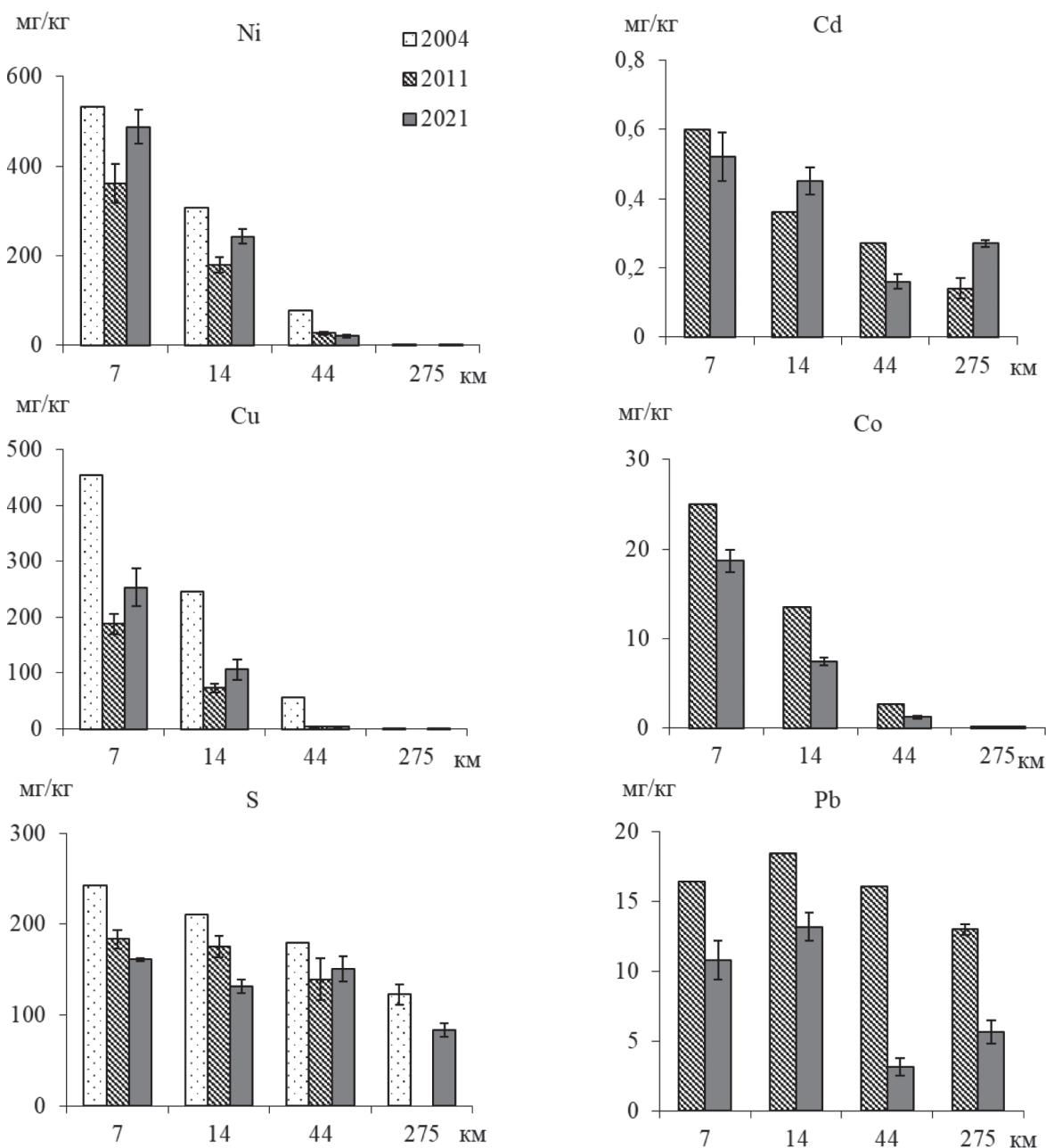


Рис. 3. Динамика содержания подвижных форм элементов в органогенном горизонте почв (подгоризонт OFH) на разном удалении от комбината “Печенганикель”. Здесь и на рис. 4 планки погрешности – стандартная ошибка.

($p < 0.05$). В условиях загрязнения содержания Сo в хвое сосны возрастают по сравнению с фоновыми значениями в 8–40 раз, Pb – 2–20 раз. Концентрации Cd в хвое сосны (44 и 14 км от комбината) либо не превышают значений регионального фона, либо сопоставимы (7 км) с фоном. Содержание серы в хвое сосны на ППН в зоне воздействия комбината варьируют в более широком диапазоне, чем в фоновых условиях, от 678 до 1839 мг/кг. На ППН, расположенных в 7 и 14 км от источника, обнаружено достоверное увеличение

концентраций S ($p < 0.05$) в хвое всех возрастных классов. Сходные закономерности изменения содержания серы выявлены в хвое ели при сокращении атмосферных выбросов SO₂ в зоне воздействия комбината “Североникель” (Копчик и др., 2016), что может отражать потребности фотосинтезирующих органов растений в этом элементе питания.

За исследуемый период на ППН в 44 км от комбината в хвое сосны выявлено снижение концентрации Ni с 26–29 (1991 г.) до 13–15 мг/кг (2019 г.), Pb – с 1.5–1.6 (2004 г.) до 0.3–0.6 мг/кг (2019 г.),

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов и серы в хвое сосны на ППН, расположенных на разном удалении от комбината “Печенганикель” по данным 2019 г., мг/кг

ППН	Ni	Cu	Co	Cd	Pb	S
Хвоя текущего года						
275 км (фон)	<u>2.5</u> 0.2	<u>3.7</u> 0.3	<u>0.04</u> 0.01	<u>0.03</u> 0.006	<u>0.02</u> 0.004	<u>756</u> 25
44 км	<u>15</u> 1	<u>7</u> 1	<u>0.35</u> 0.04	<u>0.006</u> 0.001	<u>0.05</u> 0.006	<u>1066</u> 215
14 км	<u>41</u> 3	<u>14</u> 2	<u>1.29</u> 0.14	<u>0.01</u> 0.003	<u>0.14</u> 0.02	<u>1293</u> 74
7 км	<u>25</u> 2	<u>9</u> 1	<u>0.41</u> 0.05	<u>0.04</u> 0.009	<u>0.10</u> 0.02	<u>1180</u> 113
Многолетняя хвоя (4–6 лет)						
275 км (фон)	<u>1.1</u> 0.2	<u>2.4</u> 0.1	<u>0.07</u> 0.01	<u>0.04</u> 0.01	<u>0.11</u> 0.01	<u>668</u> 47
44 км	<u>15</u> 1	<u>9</u> 1	<u>0.55</u> 0.03	<u>0.009</u> 0.002	<u>0.28</u> 0.02	<u>654</u> 67
14 км	<u>72</u> 4	<u>31</u> 2	<u>2.63</u> 0.27	<u>0.013</u> 0.003	<u>0.79</u> 0.08	<u>959</u> 30
7 км	<u>82</u> 6	<u>43</u> 4	<u>2.53</u> 0.24	<u>0.05</u> 0.01	<u>1.13</u> 0.27	<u>788</u> 38

Cd – с 0.02-0.05 (2004 г.) до 0.006–0.011 (2019 г.) мг/кг (рис. 4).

В 2019 г. концентрации Cu в хвое сосны снизились относительно предыдущего периода исследования (2011 г.), но либо остались на уровне значений 1991 и 2004 гг., либо даже превысили их. Концентрации Co в хвое возросли на более удаленных от комбината ППН (14 и 44 км), а вблизи источника загрязнения (7 км) снизились до значений, зафиксированных в 2004 г. (рис. 4).

На ППН, расположенных вблизи локального источника, на расстоянии 7 и 14 км от комбината, отмечено достоверное снижение содержания Cd и Pb в хвое ($p < 0.05$), увеличение – Ni ($p < 0.05$) (рис. 4). Результаты других исследователей (Копчик и др., 2016) также свидетельствуют о недостаточно быстром снижении в ассимилирующих органах концентраций никеля, их изменения не всегда согласуются с положительной динамикой сокращения выбросов. Это может быть связано со способностью никеля, по сравнению с другими тяжелыми металлами, более интенсивно перемещаться из корней в надземные органы (Kozlov, Barcan, 2000; Динамика..., 2009) и высоким уровнем накопления этого элемента в почвах вблизи комбината “Печенганикель”. Кроме того, содержание поллютантов хвои сосны изучено только в период активной деятельности комбината (до 2019 г.).

В целом результаты данной работы подтверждают закономерности увеличения содержания тяжелых металлов в почвенно-растительном покрове при приближении к источнику загрязнения и сохранению повышенных концентраций ТМ в условиях снижения техногенной нагрузки, которые были отмечены вокруг других крупных промышленных центров медно-никелевого производства – комбинатов “Североникель” (г. Мончегорск Мурманской области) и Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда Свердловской области) (Динамика..., 2009; Копчик и др., 2016; Воробейчик, Кайгородова, 2017; Сухарева и др., 2020). В работе Е.Л. Воробейчика, С.Ю. Кайгородовой (2017) показано отсутствие выраженного выноса металлов с загрязненной территории в период сокращения атмосферных выбросов, что рассматривается авторами как один из механизмов длительной “консервации” биоты импактного региона в угнетенном состоянии и свидетельствует о низкой эластичности экосистем по отношению к промышленному загрязнению тяжелыми металлами. Подобная картина наблюдается и на пробных площадях в зоне комбината “Печенганикель”, где значительное превышение ТМ относительно региональных фоновых значений сохраняется.

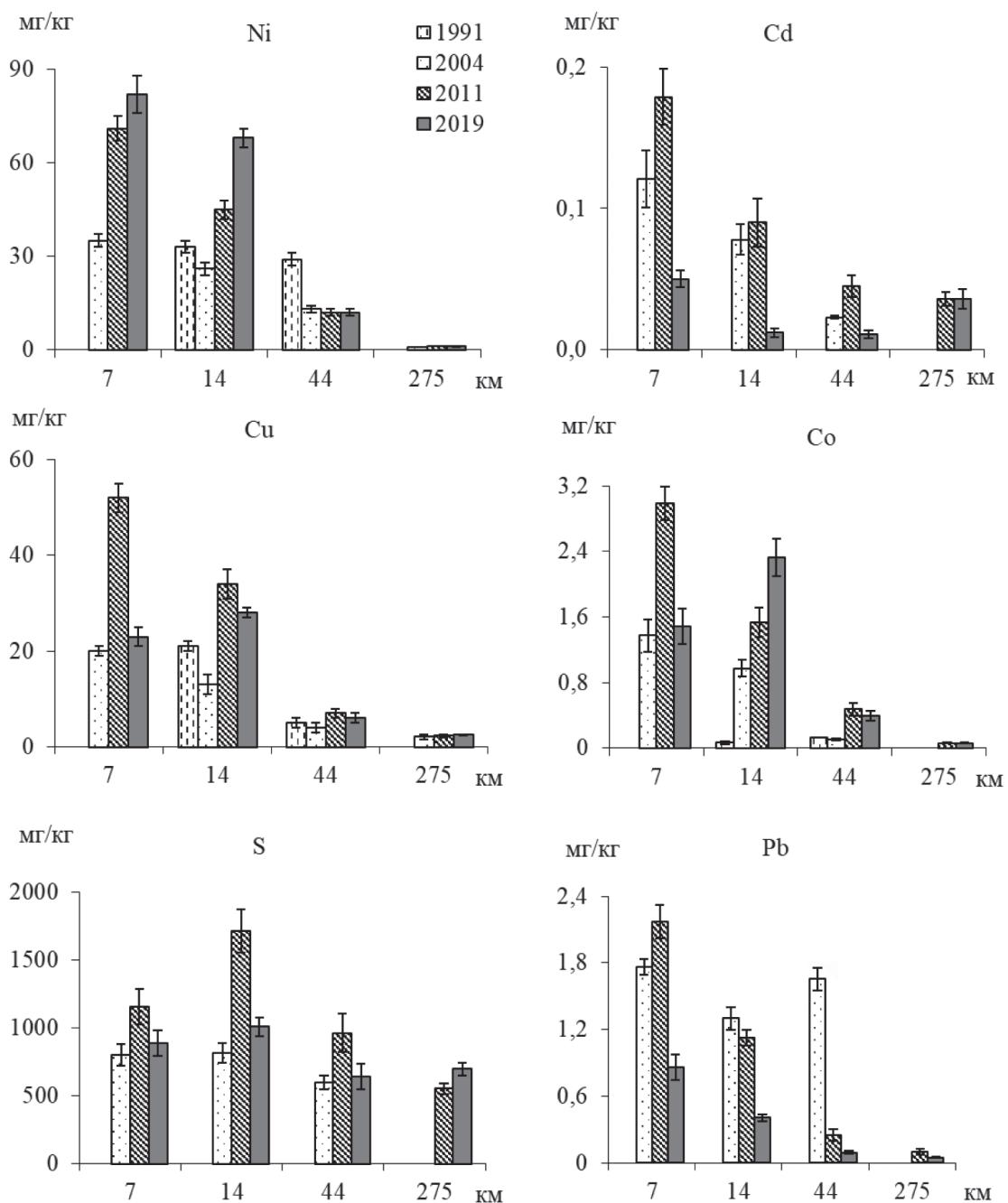


Рис. 4. Динамика содержания тяжелых металлов и серы в однолетней хвое сосны на разном удалении от комбината “Печенганикель” (1991–2019 гг.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лесные биогеоценозы в зоне воздействия медно-никелевого комбината “Печенганикель” подвержены значительной техногенной нагрузке, о чем свидетельствует многочисленные исследования и результаты данной работы. При приближении к источнику загрязнения выявлено превышение фоновых концентраций по основным загрязняющим веществам – тяжелым металлам (Cu,

Ni, Cd, Co, Pb) и соединениям серы в различных компонентах лесных биогеоценозов (атмосферные выпадения, почва, хвоя).

Впервые дана оценка химического состава атмосферных выпадений и почвы в зоне воздействия комбината “Печенганикель” в связи с закрытием плавильного цеха комбината в условиях практически полного прекращения поступления выбросов в атмосферу. При сравнении периода закрытия

комбината “Печенганикель” с периодом его активной работы наблюдалось достоверное снижение концентраций Ni, Cu, Co, Pb и Cd в атмосферных выпадениях, Co, Pb – в почве, однако содержание Ni в почвах остается высоким. Именно состав атмосферных выпадений продемонстрировал снижение техногенной нагрузки на лесные экосистемы в ответ на сокращение поступления поллютантов с аэротехногенными выбросами. Однако в почвенном покрове северотаежных лесов процесс загрязнения лесных подстилок продолжается, о чем свидетельствует увеличение в них концентрации никеля, который является одним из приоритетных загрязнителей и накапливается продолжительное время не только в почве, а также в древостое и растениях напочвенного покрова. В этой связи процесс восстановления северотаежных лесов, формирующихся в суровых природно-климатических условиях, потребует длительного периода реабилитации, особенно вблизи локальных источников загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробейчик Е.Л.* Естественное восстановление наземных экосистем после прекращения промышленного загрязнения. 1. Обзор современного состояния исследований // Экология. 2022. № 1. С. 3–41.
- 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.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17080135>
- Годовой отчет ПАО «“ГМК “Норильский никель”» за 2021 год [Электронный ресурс].
URL: https://www.nornickel.ru/upload/iblock/53b/k7mqjhb1n9o0y8eieu0adzgn3b98z8xg/NN_AR_2021_Book_RUS_26.09.22.pdf (дата обращения: 04.05.2023).
- Даувальтер В.А., Кацулин Н.А.* Аккумуляция и миграция химических элементов в арктических наземных и водных экосистемах в зоне влияния выбросов комбината “Печенганикель” // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 31–42.
- Динамика лесных сообществ Северо-Запада России / Под ред. В.Т. Ярмишко. СПб.: ВВМ, 2009. 276 с.
- Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П., Корнейкова М.В.* Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газовоздушных выбросов комбината “Печенганикель” // Почвоведение. 2014. № 5. С. 625–631.
- Кислотные осадки и лесные почвы / Под ред. В.В. Никонова, Г.Н. Копцик. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 320 с.
- Исаева Л.Г., Сухарева Т.А.* Оценка состояния зеленых насаждений в зоне воздействия комбината “Печенганикель” (Мурманская область) // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 1. С. 97–106.
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-97-106>
- Кольская горнometаллургическая компания (промышленные площадки “Никель” и “Заполярный”): влияние на наземные экосистемы / Под ред. О.А. Хлебосоловой. Рязань: Голос губернии, 2012. 92 с.
- Копцик Г.Н.* Устойчивость лесных почв к атмосферному загрязнению // Лесоведение. 2004. № 4. С. 61–71.
- Копцик Г.Н., Копцик 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.
- Лукина Н.В., Никонов В.В.* Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями сосняков на северо-западе Кольского полуострова // Лесоведение. 1993. № 6. С. 34–41.
- Лукина Н.В., Никонов В.В.* Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Ч. 1. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 216 с.
- Лянгузова И.В., Горшков В.В., Баккал И.Ю., Бондаренко М.С.* Воздействие почвенного загрязнения тяжелыми металлами на напочвенный покров сосняка лишайниково-зеленошаровидного в условиях полевого эксперимента // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 3. С. 74–86.
- Михайлова И.Н.* Динамика сообществ эпифитных лишайников в начальный период после снижения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2020. № 1. С. 43–50.
<https://doi.org/10.31857/S0367059720010072>
- Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Артюхов Д.Б. и др.* Полевое моделирование первых стадий взаимодействия кислых осадков с лесными подзолистыми почвами // Почвоведение. 1996. № 7. С. 847–856.
- Сухарева Т.А., Ерошев 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.
- Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Медведева М.В. и др.* Тяжелые металлы в почвах Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 222 с.
- 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.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20180404>
- Яхнин Э.Я., Томилина О.В., Деларов Д.А.* Атмосферные выпадения тяжелых металлов и их влияние на экологическое состояние почв // Экологическая химия. 1997. Т. 6. № 4. С. 253–259.
- Chernen'kova T.V., Bochkarev Yu.N., Fridrikh M., Bettger T.* The impact of natural and anthropogenic factors on radial tree growth on the northern Kola Peninsula //

- Contemporary Problems of Ecology.* 2014. V. 7. № 7. C. 759–769. <https://doi.org/10.1134/S199542551407004X>
- Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from Skokloster Workshop Skokloster [Электронный ресурс] // Sweden, Skokloster, 1988.
URL: https://doi.org/10.1007/978-94-009-4003-1_11 (дата обращения: 04.05.2023).
- Current state of terrestrial ecosystems in the joint Norwegian, Russian and Finish Border Area in Northern Fennoscandia. Helsinki: Finnish Forest Research Institute, 2008. 98 p.
- De Vries W., Bunker D.J.* Manual for calculating critical load of heavy metals for soils and surface water // Report of DLO Winland Staring Centre, Wageningen (The Netherlands). 1996. № 114. 133 p.
- 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 [Электронный ресурс] // Plant and Soil. 2014. V. 380. № 1–2. P. 1–45.
URL: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2056-2> (дата обращения: 04.05.2023).
- Ershov V.V., Lukina N.V., Danilova M.A. et al.* Assessment of the composition of rain deposition in coniferous forests at the northern tree line subject to air pollution // *Russian Journal of Ecology.* 2020. № 4. P. 319–328.
<https://doi.org/10.1134/S1067413620040050>
- Hale B., Robertson P.* Plant community and litter composition in temperate deciduous woodlots along two field gradients of soil Ni, Cu and Co concentrations [Электронный ресурс] // *Environmental Pollution.* 2016. V. 212. P. 41–47.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.032> (дата обращения: 04.05.2023).
- Kashulina G., Caritat P., Reimann C.* Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis [Электронный ресурс] // *Atmospheric Environment.* 2014. V. 89. P. 672–682.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.008> (дата обращения: 04.05.2023).
- Koptzik G.N., Lukina N.V., Smirnova I.E.* The effect of industrial aerial pollution on the composition of soil solutions in podzols // *Eurasian Soil Science.* 2007. № 2. P. 203–214.
- Korholo A., Weckstrom J., Nyman M.* Predicting the long-term acidification trends in small subarctic lakes using diatoms // *Journal of Applied Ecology.* 1999. № 36. P. 1021–1034.
- Kowalska A., Astel A., Boczon A., Polkowska Ź.* Atmospheric deposition in coniferous and deciduous tree stands in Poland [Электронный ресурс] // *Atmospheric Environment.* 2016. V. 133. P. 145–155.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.033> (дата обращения: 04.05.2023).
- Kozlov M.V., Barcan V.S.* Environmental contamination in the central part of Kola Peninsula: history, documentation and perception // *Ambio.* 2000. V. 29. № 8. P. 512–517.
- Methods for Integrated Monitoring in the Nordic Countries. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1989. 280 p.
- Reinds G.J., Groenenberg J.E., Vrieset W.* Critical Loads of copper, nickel, zinc, arsenic, chromium and selenium for terrestrial ecosystems at a European scale. Wageningen, Alterra, 2006. P. 46.
- Reinds G.J., Ilyin I., Groenenberg B.-J., Hettelingh J.-P.* Critical and present loads of cadmium, lead and mercury and their exceedances, for Europe and Northern Asia / Eds. J-P. Hettelingh, M. Posch, J. Slootweg. Critical load, dynamic modelling and impact assessment in Europe: CCE Status Report. Bilthoven: Coordination Centre for Effects, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2008. P. 91–101.
- Vorobeichik E.L., Trubina M.R., Khamtemirova E.V., Bergman I.E.* Long-term dynamic of forest vegetation after reduction of copper smelter emissions // *Russian J. of Ecology.* 2014. V. 45. № 6. P. 498–507.
<https://doi.org/10.1134/S1067413614060150>
- UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests [Электронный ресурс] // Thünen Institute for Forests Ecosystems. Eberswalde, Germany, 2020.
URL: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm> (дата обращения: 27.09.2024).
- World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna, Austria: IUSS, 2022. 236 p.
- Zakrzewska M., Klimek B.* Trace element concentration in tree leaves and lichen collected along a metal pollution gradient near Olkusz (Southern Poland) [Электронный ресурс] // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.* 2018. V. 100. № 2. P. 245–249.
URL: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2219-y> (дата обращения: 04.05.2023).

The Content of Heavy Metals and Sulfur in Forest Ecosystems in the Pechenganikel Smelter's Zone of Impact Due to the Reduction of Atmospheric Emissions

T. A. Sukhareva*, V. V. Ershov, E. A. Ivanova

*Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
Akademgorodok, 14a, Apatity, Murmansk region, 184209 Russian Federation*

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

The relevance of the study is determined by the need to study the state of forest ecosystems in conditions of changing anthropogenic pressure and the practical significance of improving the monitoring system for sustainable forest management. The dynamics of the intake of pollutants with atmospheric precipitation, their accumulation in the soil and tree layer (using the example of an edifier species – *Pinus sylvestris* L.) with prolonged anthropogenic impact on forest ecosystems, as well as during the period of a sharp reduction in atmospheric emissions in the impact zone of the Pechenganikel smelter (Nickel village, Murmansk region). The studies were carried out in the period from 1991 to 2021 on the test areas of permanent monitoring plots located in pine forests at various distances from the source of atmospheric emissions (7, 14, 44 km). Between 1991 and 2020, the annual volume of industrial emissions of SO₂, Ni and Cu into the atmosphere decreased. In December 2020, the release of pollutants into the atmosphere practically stopped due to the Pechenganikel metallurgical smelter being shut down. First of all, a sharp reduction in the emissions of pollutants into the atmosphere led to a change in the composition of snow and rainwater, the concentrations of pollutants (Ni, Cu, Co, Pb и Cd) in them approached regional background values. However, the concentrations of heavy metals and sulfur in the soil are still significantly higher than in typical forest ecosystems of the Murmansk region, due to the long period required for soil regeneration and self-purification.

Keywords: atmospheric precipitation, soils, *Pinus sylvestris*, atmospheric pollution, heavy metals, North taiga forests, Arctic.

Acknowledgements: The work has been carried out in order to State contract of INEP KSC RAS.

REFERENCES

- Chernen'kova T.V., Bochkarev Yu.N., Fridrikh M., Bettriger T., The impact of natural and anthropogenic factors on radial tree growth on the northern Kola Peninsula, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 759–769.
<https://doi.org/10.1134/S199542551407004X>
- Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from Skokloster Workshop Skokloster*, Sweden, Skokloster, 1988, available at:
https://doi.org/10.1007/978-94-009-4003-1_11 (May 04, 2023).
- Current state of terrestrial ecosystems in the joint Norwegian, Russian and Finish Border Area in Northern Fennoscandia*, Helsinki: Finnish Forest Research Institute, 2008, 98 p.
- Dauval'ter V.A., Kashulin N.A., Akkumulyatsiya i migratsiya khimicheskikh elementov v arkticheskikh nazemnykh i vodnykh ekosistemakh v zone vliyaniya vybrosov kombinata "Pechenganikel" (Accumulation and migration of chemical elements in Arctic terrestrial and aquatic ecosystems in the zone of influence of emissions from the Pechenganikel smelter), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, No. 3, pp. 31–42.
- De Vries W., Bunker D.J., Manual for calculating critical load of heavy metals for soils and surface water, *Report of DLO Winland Staring Centre*, Wageningen (The Netherlands), 1996, No. 114, 133 p.
- 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. № 1–2. P. 1–45. available at:
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2056-2> (May 04, 2023).
- Dinamika lesnykh soobshchestv Severo-Zapada Rossii* (Dynamics of forest communities in North-western Russia), Saint Petersburg: Izd-vo BIN RAN, 2009, 275 p.
- Ershov V.V., Lukina N.V., Danilova M.A. et al., Assessment of the composition of rain deposition in coniferous forests at the northern tree line subject to

- air pollution, *Russian Journal of Ecology*, 2020, No. 4, pp. 319–328. <https://doi.org/10.1134/S1067413620040050>
- Evdokimova G.A., Mozgova N.P., Korneikova M.V., The content and toxicity of heavy metals in soils affected by aerial emissions from the Pechenganikel plant, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 5, pp. 504–510.
- Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Medvedeva M.V. et al., *Tyazhelye metally v pochvakh Karelii* (Heavy metals in soils of Karelia), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2015, 222 p.
- Godovoi otchet PAO «GMK “Noril'skii nikel”» za 2021 god* (Annual report of PJSC MMC Norilsk Nickel for 2021), available at: https://www.nornickel.ru/upload/iblock/53b/k7mqjh_b1n9o0y8eieu0adzgn3b98z8xg/NN_AR_2021_Book_RUS_26.09.22.pdf (May 04, 2023).
- Hale B., Robertson P., Plant community and litter composition in temperate deciduous woodlots along two field gradients of soil Ni, Cu and Co concentrations, *Environmental Pollution*, 2016, Vol. 212, pp. 41–47, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.032> (May 04, 2023).
- Isaeva L.G., Sukhareva T.A., Otsenka sostoyaniya zelenykh nasazhdennii v zone vozdeistviya kombinata “Pechenganikel” (Murmanskaya oblast') (Assessment of the green spaces' state in the impact zone of the Pechenganikel smelter, the Murmansk region), *Vestnik MGTU*, 2021, Vol. 24, No. 1, pp. 97–106.
- Kashulina G., Caritat P., Reimann C., Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis, *Atmospheric Environment*, 2014, Vol. 89, pp. 672–682, available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.008> (May 04, 2023).
- Kislotnye osadki i lesnye pochvy* (Acid precipitation and forest soils), Apatity: KNTs RAN, 1999, 320 p.
- Kol'skaya gorno-metallurgicheskaya kompaniya (promyshlennye ploshchadki “Nikel” i “Zapolyarnyi”): vliyanie na nazemnye ekosistemy* (Kola Mining and Metallurgical Company (industrial sites “Nickel” and “Zapolyarny”): Impact on terrestrial ecosystems), Ryazan: Golos gubernii, 2012, 92 p.
- Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E., Kudryavtseva A.D., Turbabina K.A., Reaktsiya lesnykh ekosistem na sokrashchenie atmosfernykh promyshlennykh vybrosov v Kol'skoi Subarktike (The response of forest ecosystems to reduction in industrial atmospheric emission in the Kola Subarctic), *Zhurnal obshchei biologii*, 2016, Vol. 77, No. 2, pp. 145–163.
- Koptsik G.N., Lukina N.V., Smirnova I.E., The effect of industrial aerial pollution on the composition of soil solutions in podzols, *Eurasian Soil Science*, 2007, No. 2, pp. 203–214.
- Koptsik G.N., Ustoichivost' lesnykh pochv k atmosfernomu zagryazneniyu (Resistance of forest soils to air pollution), *Lesovedenie*, 2004, No. 4, pp. 61–71.
- Korhol A., Weckstrom J., Nyman M., Predicting the long-term acidification trends in small subarctic lakes using diatoms, *Journal of Applied Ecology*, 1999, No. 36, pp. 1021–1034.
- 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, available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.033> (May 04, 2023).
- Kozlov M.V., Barcan V.S., Environmental contamination in the central part of Kola Peninsula: History, documentation and perception, *Ambio*, 2000, Vol. 29, No. 8, pp. 512–517.
- Lukina N.V., Nikonov V.V., *Biogeokhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyah aerotekhnogenogo zagryazneniya* (Biogeochemical cycles in the Northern forests subjected to air pollution), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1996, Part 1, 216 p.
- Lukina N.V., Nikonov V.V., Pogloshchenie aerotekhnogennykh zagryaznitelei rasteniyami sosnyakov na severo-zapade Kol'skogo poluostrova (Absorption of aerotechnogenic pollutants by pine forest plants in the north-west of the Kola Peninsula), *Lesovedenie*, 1993, No. 6, pp. 34–41.
- Lyanguzova I.V., Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu., Bondarenko M.S., Vozdeistvie pochvennogo zagryazneniya tyazhelyimi metallami na napochvennyi pokrov sosnyaka lishainikovo-zelenomoshnogo v usloviyah polevogo eksperimenta (Influence of soil pollution (heavy metals) on the lichen pine forest soil cover in conditions of field experiment), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universitet, Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2015, No. 3 (27), pp. 74–86.
- Methods for Integrated Monitoring in the Nordic Countries*, Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1989, 280 p.
- Mikhailova I.N., Dynamics of epiphytic lichen communities in the initial period after reduction of emissions from a copper smelter, *Russian Journal of Ecology*, 2020, Vol. 51, No. 1, pp. 38–45.
- Reinds G.J., Groenenberg J.E., Vrieset W., *Critical Loads of copper, nickel, zinc, arsenic, chromium and selenium for terrestrial ecosystems at a European scale*, Wageningen: Alterra, 2006, 46 p.
- Reinds G.J., Ilyin I., Groenenberg B.-J., Hettelingh J.-P., Critical and present loads of cadmium, lead and mercury and their exceedances, for Europe and Northern Asia, In: *Critical load, dynamic modelling and impact assessment in Europe: CCE Status Report*, Bilthoven: Coordination Centre for Effects, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2008, pp. 91–101.
- Shergina O.V., Mikhailova T.A., Kalugina O.V. Izmenenie biogeokhimicheskikh pokazatelei v sosnovykh lesakh pri tekhnogennom zagryaznenii (Change of biogeochemical indexes in pine forests under technogenic pollution), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2018, No. 4, pp. 29–38. <https://doi.org/10.15372/SJFS20180404>

- Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Artyukhov D.B., Korobova N.L., Pakhomov A.P., Tolpeshta I.I., Polevoe modelirovaniye pervykh stadii vzaimodeistviya kislykh osadkov s lesnymi podzolistymi pochvami (Field modeling of the first stages of interaction between acid precipitation and forest podzolic soils), *Pochvovedenie*, 1996, No. 7, pp. 847–856.
- Sukhareva T.A., Ershov V.V., Isaeva L.G., Shkondin M.A. Otsenka sostoyaniya severotaezhnykh lesov v usloviyakh snizheniya promyshlennykh vybrosov kombinatom "Severonikel'" (Assessment of the state of the North taiga forests in terms of reducing industrial emissions by the Severonikel), *Tsvetnye metally*, 2020, No. 8, pp. 33–41.
- UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*, Eberswalde, Germany: Thünen Institute for Forests Ecosystems, 2020, available at: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm> (September 27, 2024).
- Vorobeichik E.L., Natural recovery of terrestrial ecosystems after the cessation of industrial pollution. 1. A state-of-the-art review, *Russian Journal of Ecology*, 2022, Vol. 53, No. 1, p. 1–39.
- Vorobeichik E.L., Kaigorodova S.Y., Long-term dynamics of heavy metals in the upper horizons of soils in the region of a copper smelter impacts during the period of reduced emission, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 8, pp. 977–990.
- Vorobeichik E.L., Trubina M.R., Khantemirova E.V., Bergman I.E., Long-term dynamic of forest vegetation after reduction of copper smelter emissions, *Russian Journal of Ecology*, 2014, Vol. 45, No. 6, pp. 498–507. <https://doi.org/10.1134/S1067413614060150>
- World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, Vienna, Austria: IUSS, 2022, 236 p.
- Yakhnin E.Ya., Tomilina O.V., Delarov D.A., Atmosfernye vypadeniya tyazhelykh metallov i ikh vliyanie na ekologicheskoe sostoyanie pochv (Atmospheric emissions of heavy metals and their impact on the ecological state of soils), *Ekologicheskaya khimiya*, 1997, Vol. 6, No. 4, pp. 253–259.
- 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, No. 2, pp. 245–249, available at: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2219-y> (May 04, 2023).