

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ЭКОЛОГИЮ КОЛЬСКОГО СЕВЕРА: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. А. Гашкина¹, А. В. Соколов^{1,2}, Т. И. Моисеенко¹

¹ Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН (Москва, Российская Федерация)

² Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 24 марта 2026 г.

Для цитирования

Гашкина Н. А., Соколов А. В., Моисеенко Т. И. Оценка и прогноз воздействия медно-никелевого производства на экологию кольского Севера: результаты моделирования // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 419—429. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-419-429.

Рассматриваются результаты моделирования динамики концентрации никеля и меди в почвах, воде и донных отложениях озер, расположенных в зоне влияния комбината «Печенганикель» на Кольском полуострове, в том числе прогноз темпов восстановления и состояния природных сред к 2050 г. после закрытия плавильного производства в 2020 г. Установлено, что водные системы наиболее быстро реагируют на снижение техногенной нагрузки, а почвы демонстрируют наибольшую инерционность. По прогнозу высокие концентрации Ni и Cu в воде озер будут поддерживаться за счет выщелачивания и вымывания из почв, в которых содержание металлов ожидается примерно в три раза больше даже повышенного регионального фона.

Ключевые слова: атмосферные выпадения, никель, медь, суб арктические водные и наземные экосистемы.

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами — одна из наиболее актуальных экологических проблем современности. По масштабам загрязнения наиболее значимыми источниками являются предприятия горно-обогатительной и металлургической промышленности [1]. Это связано со все возрастающими объемами добычи и переработки металлов, их рассеиванием в окружающей среде [2]. Основным способом уменьшения загрязнения является модернизация производства или его остановка. Например, установка сверхдлинных труб помогла снизить локальное экстремальное загрязнение в Эль-Пасо (Техас, США) [3] и в Коппер Клифф (Садбери, Канада) [4]. Однако столетия работы плавильных заводов неизбежно приводят к значительному

накоплению тяжелых металлов в биогеоценозах [5]. Остановка плавильного завода не означает прекращения поступления металлов — историческое, накопленное загрязнение от промышленного производства может продолжать существенно влиять на окружающую среду [3]. Долгосрочность воздействия (даже спустя несколько столетий) проиллюстрирована на примере исторических шлаковых отвалов, которые до сих пор загрязняют почвы и донные отложения речных систем в Рудава-Яновицких горах (юго-запад Польши), хотя выплавка меди завершилась там в XVI в. [6].

Масштабное хозяйственное освоение Арктической зоны России привело к значительному накоплению загрязняющих веществ в природной среде. Для арктических территорий характерны слабая устойчивость к антропогенным воздействиям и низкая восстановительная способность, что приводит к со-

хранению многих экологических проблем, несмотря на значительное снижение текущих выбросов загрязняющих веществ [7; 8].

Объектом исследования данной работы является территория (водосборы малых озер) вокруг комбината «Печенганикель». Малые озера — водоемы преимущественно атмосферного питания, и их водосборы наиболее адекватно отражают последствия выпадения атмосферных загрязнений. Комбинат расположен на северо-западе Кольского полуострова. До недавнего времени он был одним из основных или основным источником выбросов меди, никеля и диоксида серы в атмосферу региона. Плавильный цех комбината в поселке городского типа Никель начал производственную деятельность в 1946 г. В 1956 г. в городе Заполярный заработал горно-обогатительный комбинат. Выбросы в атмосферу тяжелых металлов (преимущественно никеля и меди) и других загрязняющих веществ, привели к серьезным экологическим последствиям, включая деградацию почв, загрязнение водных объектов и негативное воздействие на биоту. Интенсивное исследование последствий загрязнения началось лишь в 1990-х годах. В этот период было проведено много исследований, подтвердивших негативные последствия атмосферных выбросов тяжелых металлов и диоксида серы и их поступления в наземные и водные системы [9—13].

На основе системного многолетнего мониторинга состояния вод озер Кольского полуострова и привлечения дополнительных материалов, собранных до 2020 г., была создана модель трансформации атмосферного загрязнения только для одного из приоритетных загрязняющих веществ — никеля [14]. Прекращение более чем семидесятилетней деятельности комбината (в декабре 2020 г. его плавильные производства остановили работу) потребовало существенной модификации модели. Этому способствовало и новое проведенное в 2023 г. натурное обследование озер, результаты которого позволяют совершенствовать модель трансформации загрязнения уже в условиях прекращения не только эмиссии металлов, но и кислотных выпадений.

Целью данного исследования является использование усовершенствованной модели для анализа динамики загрязнения не только никелем, но и медью вод, донных отложений (ДО) и почв водосборов малых озер в зоне влияния комбината, получение количественных оценок вклада выщелачивания из почв в формирование концентраций Ni и Cu в озерной воде в постэмиссионный период, а также уточнение прогнозных значений концентраций Ni и Cu в воде, почвах до 2050 г. в условиях нулевых прямых выбросов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются водосборы малых озер в зоне влияния комбината «Печенганикель» (до 100 км). Работы по широкомасштабному обследо-

ванию озер Кольского полуострова начались в 1990 г. и продолжаются до настоящего времени. В основу модели легли многочисленные натурные и экспериментальные данные. Прежде всего нужно отметить систематические (с 1990 по 2023 гг. с интервалом 4—5 лет) данные по состоянию 28 озер вокруг комбината, которые являются основной надежной базой построенной модели. В процессе выполнения работы были привлечены дополнительные опубликованные данные по атмосферным выбросам, выпадениям, состоянию почв и донных отложений. Технология сбалансированной идентификации (обеспечивающая баланс между близостью модели к данным и ее сложностью) [15] позволила провести идентификацию многочисленных неизвестных параметров и построить по разнородным экспериментальным данным нелинейную распределенную модель динамики трансформации атмосферного загрязнения [14].

Приведем основные уравнения модели, описывающие динамику загрязняющего вещества (Ni или Cu) для водосбора малого озера.

Выпадение загрязняющего вещества от источника в городе Никель (индекс n) с интенсивностью эмиссии $P_n(t)$ в момент времени t на расстоянии r_n по направлению φ_n (полярные координаты) определяется мультипликативным представлением

$$D_n(t, r_n, \varphi_n) = P_n(t) R_n(r_n) FI_n(\varphi_n).$$

Аналогично для источника в Заполярном (индекс z):

$$D_z(t, r_z, \varphi_z) = P_z(t) R_z(r_z) FI_z(\varphi_z).$$

Для каждого водосбора выпадения загрязняющих веществ в растворимой $Dsol(t)$ и нерастворимой $Dunsol(t)$ формах от двух источников суммируются:

$$Dsol(t) = D_n(t, \varphi_n, r_n) sol(r_n) + D_z(t, \varphi_z, r_z) sol(r_z),$$

$$Dunsol(t) = D_n(t, \varphi_n, r_n) unsol(r_n) + D_z(t, \varphi_z, r_z) unsol(r_z),$$

где $sol(r_n)$, $sol(r_z)$ и $unsol(r_n)$, $unsol(r_z)$ — доли растворимых и нерастворимых форм.

Динамика запасов (содержания) загрязнения в почве $S(t)$. В почве остаются только нерастворимые формы, выпавшие в бесснежный (1-Snow) период. Выщелачивание переводит загрязнения в растворимую форму, которая выносится из почвы в воду:

$$\frac{dS}{dt} = Dunsol(t)(1 - Snow) - leach \cdot S(t),$$

$$S(0) = S_{fon},$$

где S_{fon} — фоновое значение; S_{now} — снежный период (часть года с примерзшей почвой).

Динамика содержания (концентрации) загрязнения в воде озера $W(t)$. Три составляющих: все растворимые выпадения, все растворимые формы, образовавшиеся в почве в результате выщелачивания, вынос со стоком:

$$\begin{aligned} dW / dt = & \\ = & \frac{Dsol(t) + leach \cdot S(t) \cdot SQS}{(SQW + SQS) - precip \cdot W} \times \\ & \times \frac{1}{H + precip}, \end{aligned}$$

где $precip$ — осадки; SQW и SQS — площади водной поверхности и суши водосбора; H — глубина озера.

Динамика запасов в донных отложениях $B(t)$. Донные отложения формируются из нерастворимых форм, попадающих непосредственно на поверхность озера, из нерастворимых форм, попадающих непосредственно на сушу в зимний период (и попавших в озеро в половодье), и из фонового значения B_{fon} , отражающего доиндустриальные процессы выветривания коренных пород и выщелачивания почв:

$$\begin{aligned} dB / dt = & \\ = & Dinsol(t) \cdot \frac{1 + SQS}{SQW \cdot Snow} + \\ & + B_{fon}. \end{aligned}$$

Полное формальное описание модели можно найти в [14]. Новое натурное обследование озер в 2023 г. при нулевых выбросах позволило уточнить параметры модели. Усовершенствованная модель трансформации загрязнения, программы расчетов и соответствующие данные находятся в открытом доступе, что позволяет проверить приведенные результаты и/или получить новые [16].

Результаты

Выбросы Ni и Cu и их выпадения показаны на рис. 1. Выпадения Ni и Cu в целом пропорциональны выбросам и отражают их нарастание с максимальными выбросами в 1980-х годах, увеличение после спада в 1990-х годах и снижение вплоть до их прекращения после 2021 г. По интенсивности выпадений можно выделить характерные периоды: 1946—1980 гг. — нарастание нагрузок на водосборы,

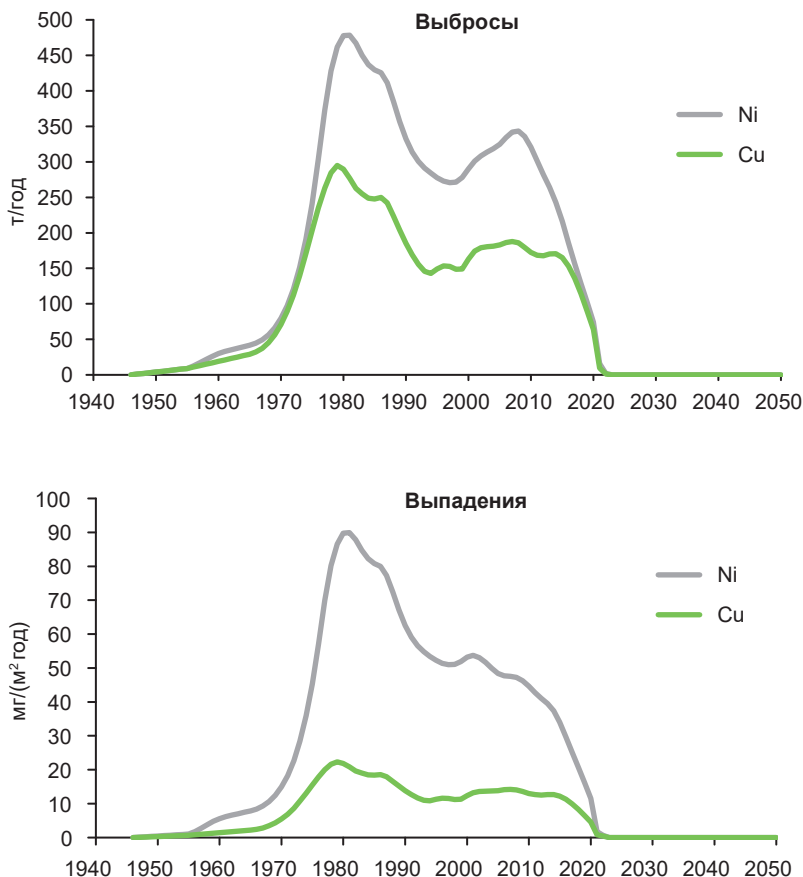


Рис. 1. Динамика атмосферных выбросов Ni и Cu (до 1975 г. — реконструкция, после 1975 г. — аппроксимация официальных данных) и модельные расчеты выпадений Ni и Cu, представленные для усредненного водосбора

Fig. 1. Dynamics of atmospheric emissions of Ni and Cu (before 1975 — reconstruction, after 1975 — approximation of official data) and model calculations of Ni and Cu deposition, presented for an average catchment area

1980—2005 гг. — максимальные нагрузки, 2005—2022 гг. — снижение нагрузок и 2022—2050 гг. — прогноз при нулевых выбросах.

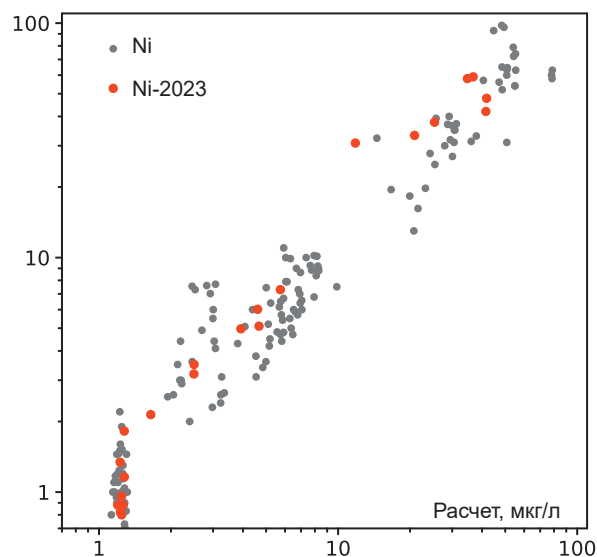
В балансовой оценке распределения выпадений Ni и Cu на потери со стоком приходится около 20%, на накопление Ni и Cu в ДО — около 45%, а в почве — около 35%. Согласно модельным расчетам (табл. 1), потери со стоком в среднем до остановки работы комбината составляли 8,2 и 2,2 мг/(м²·год), а после остановки — 2,9 и 0,8 мг/(м²·год) по Ni и Cu соответственно. Интенсивность накопления Ni и Cu в ДО в среднем составляла соответственно 17,0 и 5,0 мг/(м²·год) во время работы комбината, тогда как по прогнозу после его остановки должно начаться снижение накопления до величин 0,6 и 0,1 мг/(м²·год) для Ni и Cu соответственно. Интенсивность накопления Ni и Cu в почве в среднем составляла соответственно 12,8 и 3,3 мг/(м²·год) за время работы комбината, тогда как по прогнозу после его остановки должно начаться медлен-

Таблица 1. Изменение распределения выпадений Ni и Cu по модельным балансовым расчетам для усредненного водосбора за характерные периоды, а также прогноз их перераспределения до 2050 г.

Table 1. Changes in the distribution of Ni and Cu deposition according to model balance calculations for an average catchment area within typical periods, as well as a prediction of their redistribution up to 2050.

Параметр, мг/м²год	Период			Прогноз
	1946—1980	1980—2005	2005—2022	2022—2050
<i>Никель</i>				
Потери со стоком	3,7	13,0	9,8	2,9
Аккумуляция в ДО	7,9	30,2	14,4	–0,55
Аккумуляция в почве	5,9	23,1	10,2	–0,74
<i>Медь</i>				
Потери со стоком	1,3	3,1	2,8	0,84
Аккумуляция в ДО	2,9	7,0	5,2	–0,05
Аккумуляция в почве	1,7	4,8	3,8	–0,26

Данные, мкг/л



Данные, мкг/л

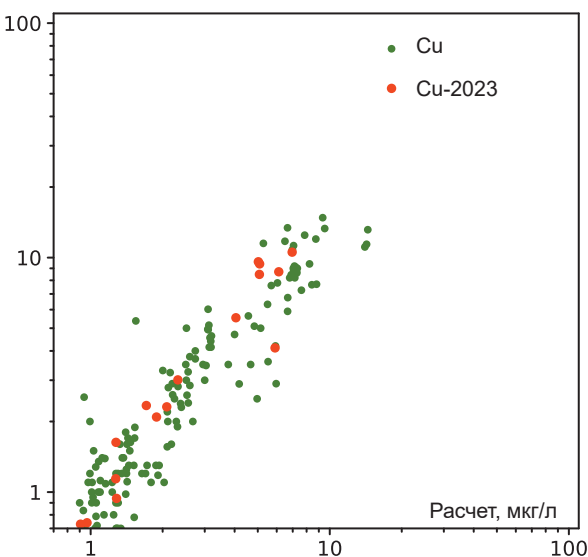


Рис. 2. Натурные данные и модельные значения концентраций Ni и Cu в воде озер по всем годам исследований (данные за 2023 г. обследования в постэмиссионный период выделены красным) в логарифмических шкалах (для охвата широкого диапазона величин — около двух порядков)

Fig. 2 Field data and model values of Ni and Cu concentrations in lake water for all years of research (data for the 2023 post-emission period survey is highlighted in red) on logarithmic scales (to cover a wide range of values — about two orders of magnitude)

ное выщелачивание из почвы с интенсивностью 0,8 и 0,3 мг/(м²год) для Ni и Cu соответственно. Максимальные накопления Ni и Cu в ДО и почве, а также потери со стоком относятся к периоду максимальных выпадений 1980—2005 гг. (см. табл. 1).

На рис. 2 приведены натурные данные и модельные значения концентраций Ni и Cu в воде озер по всем годам исследований, отдельно выделен 2023-й год обследования, проведенного в постэмиссионный период. Между расчетными и эксперименталь-

ными значениями наблюдается удовлетворительное соответствие: точки преимущественно располагаются вдоль линии, близкой к линейной зависимости в логарифмических координатах.

На рис. 3 приведены расчетные функции распределения концентраций Ni и Cu в воде, ДО и почве в зависимости от расстояния до источников выбросов по характерным годам с прогнозом на 2050 г. Расчетные функции, во-первых, показывают импактную и буферные зоны, первая из которых более

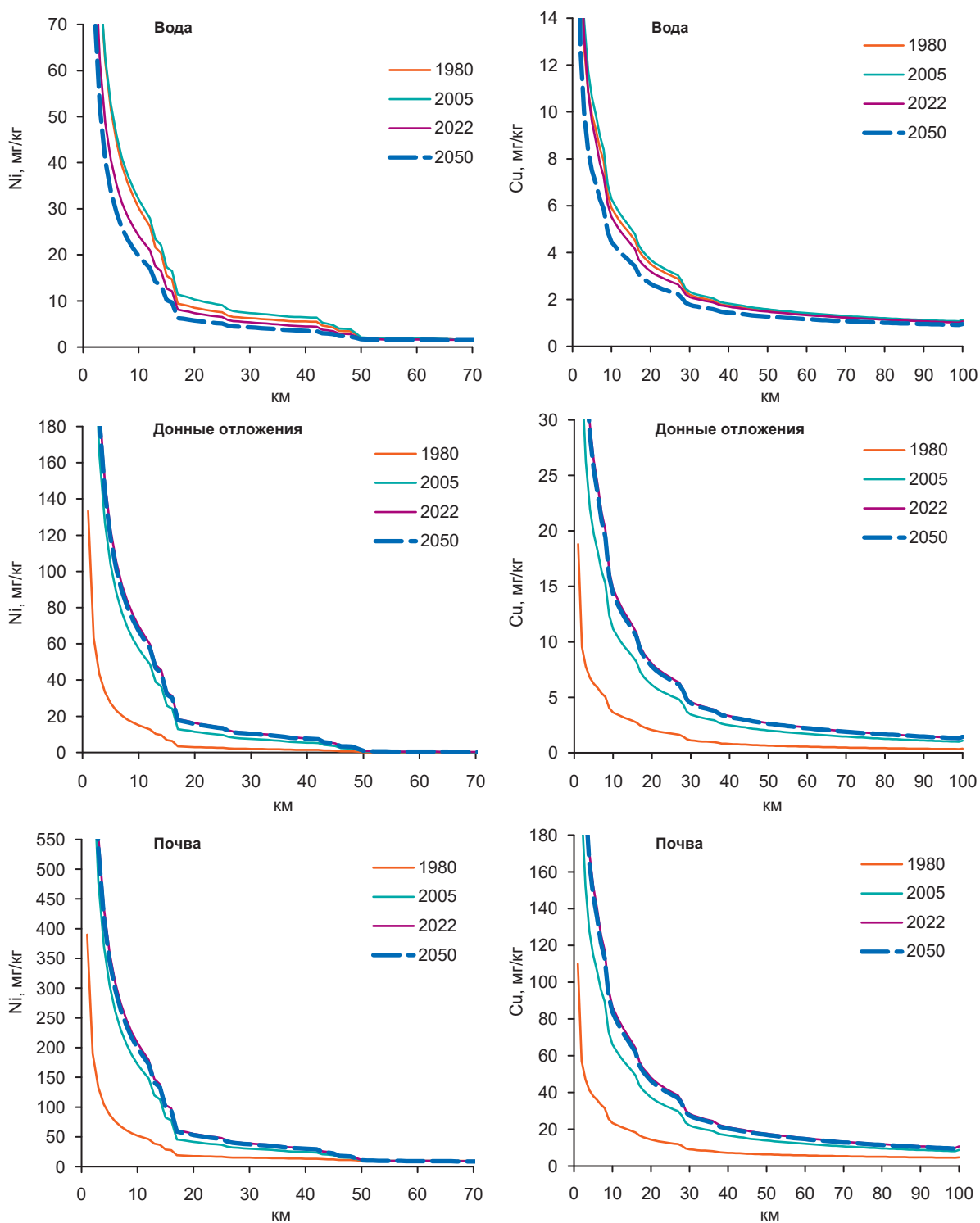


Рис. 3. Модельные функции распределения концентраций Ni и Cu в воде, ДО и почве в зависимости от расстояния до источников выбросов по годам с прогнозом на 2050 г.
Fig. 3. Model distribution functions of Ni and Cu concentrations in water, sediments and soil depending on the distance to emission sources by year with a prediction for 2050

локальна для Ni, чем для Cu, во-вторых, отражают динамику накопления в различных средах, а именно быструю реакцию вод и медленную почв и ДО в ответ на изменение поступающих выбросов Ni и Cu.

В табл. 2 показаны расчетные концентрации Ni и Cu в воде озер, а также концентрации в почве для усредненного водосбора в характерные годы. В годы проведения обследования озер (2005, 2014

Таблица 2. Результаты моделирования концентраций Ni и Cu в воде и почве для усредненного водосбора по характерным годам с прогнозом на 2050 г. Для 2005, 2014 и 2023 гг. для общих концентраций Ni и Cu (вода) указана относительная погрешность моделирования (отклонение модельных значений от измерений).

Table 2. Results of modeling Ni and Cu concentrations in water and soil for an average catchment area for typical years with a prediction for 2050. For 2005, 2014, and 2023, the relative modeling error (deviation of model values from measurements) is indicated for total Ni and Cu concentrations in water.

Концентрация	Год					Прогноз
	1946	1980	2005	2014	2023	2050
<i>Вода</i>						
Общая концентрация Ni, мкг/л:	1	13	15±3,0	16±2,4	11±2,1	10,4
за счет выпадений	0	11	7,7	6,2	0	0
за счет выщелачивания	1	2	7,7	8,8	11	10,4
Общая концентрация Cu, мкг/л:	0,5	3,7	3,9±0,8	4,0±0,8	2,9±0,3	2,7
за счет выпадений	0	2,9	1,9	1,7	0	0
за счет выщелачивания	0,5	0,8	2,0	2,3	2,9	2,7
<i>Почва</i>						
Ni, мг/кг	14	32	88	100	105	99
Cu, мг/кг	2	15	41	48	53	50

и 2023 гг.) приведены отклонения модельных концентраций от измеренных значений, которые не превышали 25%.

Обсуждение

Динамическое моделирование выбросов и выпадений загрязняющих веществ за исторический период работы производств в Никеле и Заполярном основано на официальных данных (после 1975 г.) и на балансовой реконструкции (до 1975 г.). Согласно модели, выбросы предприятий распределяются по территории в зависимости от расстояния и направления до источника. Такой подход подкрепляется исследованием [17]. В этой работе решалась обратная задача — на основе данных по сухим и влажным выпадениям, собранным из проб снега и дождя, рассчитывался общий объем осажденных на почву Ni и Cu для близлежащих (к источникам) территорий на Кольском полуострове. Оцененные таким образом выбросы показали высокую корреляцию с официальными данными.

Отображенные на рис. 2 натурные данные и результаты моделирования за 2023 г. (постэмиссионный период) хорошо согласуются с общей тенденцией, определяемой полной выборкой (всеми годами исследований за 30-летний период), не демонстрируют систематического смещения. Оно минимально в среднем диапазоне величин. Наблюдаемое некоторое рассеяние точек при малых значениях (около 1) объясняется повышенной относительной вариабельностью и повышенной относительной погреш-

ностью измерений в области, близкой к фоновым значениям. Основанная на других принципах, динамическая модель CHUM-AM, которая позволяет описывать процессы (химические реакции, связывание металлов органикой и др.) накопления и вымывания металлов на протяжении нескольких столетий, не учитывает пространственную неоднородность и использует единый тип почвы с усредненными характеристиками (pH, органические вещества и др.). При этом значения могут завышаться или занижаться максимум в три раза, однако, несмотря на упрощения, модель адекватно описывает основные процессы в исторической перспективе [18]. Хотя предложенная нами усовершенствованная модель при рассмотрении усредненного водосбора также не учитывает пространственную неоднородность, она дает лучшую адаптацию к натурным данным (см. рис. 2, табл. 2), что указывает на воспроизводимость результатов и устойчивость используемой модели.

Рассмотрим уровни накопления Ni и Cu в различных средах и оценим их концентрации в постэмиссионный период. Поверхностные воды — более лабильный компонент природной среды, что объясняет стремительное повышение концентраций Ni и Cu в ответ на нарастание выбросов в атмосферу и их выпадений, которое достигло максимума к 1980-м годам (см. рис. 3). Воды озер также быстро реагируют и на их снижение, и отклики в концентрациях Ni и Cu в воде достаточно значительны сразу после прекращения выбросов. Быстрая реакция вод на изменение характера и интенсивности выбросов на-

блюдалась и в Садбери, Канада (крупнейшем в мире комплексе по выплавке Ni и Cu): после закрытия плавильного завода в Конистоне и строительства сверхдлинной трубы в Копер-Клиффе в 1972 г. водные системы начали восстанавливаться без каких-либо дополнительных мер [4]. Аналогичным образом ужесточение канадских экологических нормативов по выбросам в 1990-х годах привело к улучшению качества вод [19].

Увеличение накопления Ni и Cu в ДО наблюдалось вплоть до остановки комбината и было наиболее значительным в период максимальных нагрузок 1980—2005 гг. (см. рис. 3). Данные моделирования демонстрируют, что к 2050 г. не следует ожидать заметного снижения концентраций металлов. Нижние слои ДО доиндустриального периода могут характеризовать фоновые региональные концентрации. Например, концентрации Ni и Cu в ДО озера Шоунирви, расположенного в 20 км от Никеля и в 7 км от Заполярного, в слоях, датированных 1950 г., отражают фоновое доиндустриальное содержание 26 и 15 мг/кг по Ni и Cu соответственно [12]. В Канаде послойный анализ (1 мм) колонки ДО озера Вермиллион, расположенного примерно в 32 км к западу от Садбери, свидетельствует о хорошем соответствии максимумов и минимумов накопления Ni и Cu в ДО объемам их производства, однако по прошествии 20 лет после введения экологических норм в 1990-х годах современные концентрации (286 и 79 мг/кг по Ni и Cu соответственно) в 5—7 раз выше в сравнении с доиндустриальными (в 1870-х годах) концентрациями (37 и 14 мг/кг по Ni и Cu соответственно) из-за неатмосферного притока накопленных Ni и Cu с большого по размеру водосбора реки Вермиллион и дренажа хвостохранилищ [20].

Накопление Ni и Cu в почве значительно увеличивалось вплоть до остановки комбината, при этом максимальное накопление в почве от 200 до 1650 мг/кг Ni и от 100 до 580 мг/кг Cu наблюдается в 10-километровой зоне (см. рис. 3). Если сравнивать уровень загрязнения почв в Садбери, то максимальное накопление 300—1600 и 370—1300 мг/кг для Ni и Cu соответственно наблюдалось в 15-километровой зоне, 120 и 370 мг/кг — на расстоянии 40 км и выходило на региональные значения 30 и 93 мг/кг для Ni и Cu соответственно уже на расстоянии более 90 км от плавильного комплекса [5]. Следует отметить, что, как и в Садбери, воздействие загрязнения от комбинатов на региональном уровне распространяется дальше для Cu (см. рис. 3). За короткое лето Ni и Cu, поступившие с атмосферными выпадениями на подстилающую поверхность, задерживаются в почвах в период вегетации и прочно закрепляются в их верхнем тонком органо-генном слое. Образцы гумуса, собранные на площади 37 тыс. км² на юго-западе Финляндии, показали, что содержание металлов в гумусе больше зависит от атмосферного загрязнения, а точечные источники, такие как металлургические заводы в Пори-Харья-

валта, вызывают локально высокие аномалии концентраций металлов в гумусе даже через много лет после сокращения промышленных выбросов [21]. Более чем 100-летние работы комплекса в Садбери значительно отразились именно на накоплении в органо-генном слое почв [5]. Например, натурные данные различных горизонтов почв на разном удалении от комбината «Печенганикель» показывают следующие концентрации в органо-генном слое почв: они могли достигать 509 и 475 мг/кг на расстоянии 7 км и 235 и 128 мг/кг на расстоянии 34 км для Ni и Cu соответственно [22]. Моделирование процессов накопления и вымывания металлов из почв по модели CHUM-AM показывает ключевую роль органического вещества в удержании и переносе металлов, и в этом отношении Ni легче вымывается, тогда как до 80% Cu находится в связанном виде, и растворенное органическое вещество способствует переносу Cu [18]. Изотопное фракционирование Ni и Cu генетических горизонтов почв в северо-восточной Норвегии, испытывающей влияние предприятий цветной металлургии на Кольском полуострове, также подтверждает, что для Cu важную роль играет комплексообразование с гуминовыми веществами [23]. Заметим, что согласно расчетам импактная зона для Ni ограничивается 17 км, а буферная — 50 км, тогда как для Cu импактная зона простирается на 30 км, а буферная — более чем на 70 км. Именно различия в поведении металлов отражаются на формировании более локальной импактной зоны для Ni (см. рис. 3) и большем относительном накоплении Cu в почве (см. табл. 2).

В табл. 2 показано, как формировались концентрации Ni и Cu в воде озер, а также концентрации в почве для усредненного водосбора в характерные годы. Если концентрации Ni и Cu в воде озер обеспечивались больше за счет атмосферных выпадений до 1980 г., а к 2005 г. вклад выщелачивания из почв стал сопоставим с атмосферным поступлением, то после остановки комбината они полностью обеспечиваются за счет выщелачивания и вымывания металлов из почв (см. табл. 2). В 2005—2022 гг. потери со стоком для Ni составляют больше, чем для Cu, по сравнению с интенсивностью аккумуляции в почве (см. табл. 1). Как результат концентрация в воде озер для Ni формируется больше, чем для Cu, относительно накопленных их содержаний в почве (табл. 2). Для усредненного озера, если до начала работы комбинатов выщелачивание обеспечивало концентрации Ni и Cu менее 2 и 1 мкг/л соответственно, в то время как по прогнозу содержания Ni и Cu ожидаются ~10 и 3 мкг/л соответственно. Концентрации Ni и Cu в воде озер после 2023 г. меняются слабо и находятся в пределах точности моделирования (табл. 2). Так, для рыбохозяйственных водоемов установлены следующие предельно допустимые концентрации: Ni — 10 мкг/л, Cu — 1 мкг/л [24]. Вопреки ожиданиям для усредненного озера про-

гнозные концентрации в воде будут больше или равны предельно допустимым концентрациям.

По среднемировым показателям фоновые концентрации Ni и Cu в поверхностном слое почвы оцениваются в 18 и 14 мг/кг соответственно, что равно содержанию в верхней земной коре [25]. Характеристикой фоновых региональных концентраций могут служить не только слои донных отложений доиндустриального периода, но и концентрации в минеральных горизонтах почв. Натурные данные минерального горизонта почв на разном удалении от комбината «Печенганикель» показывают следующие концентрации: 47 и 20 мг/кг на расстоянии 7 км и 37 и 19 мг/кг на расстоянии 34 км для Ni и Cu соответственно [22]. Следует заметить, что, как и в Садбери, слои ДО доиндустриального периода и концентрации в минеральных горизонтах почв дают более высокий региональный фон почв, чем по миру, особенно для Ni. Так, для почв усредненного водосбора Кольского полуострова в районе комбината «Печенганикель» в постэмиссионный период по прогнозу содержания Ni и Cu составят 99 и 50 мг/кг соответственно (см. табл. 2), что значительно больше оцененных региональных фоновых концентраций (26—37 и 16—19 мг/кг для Ni и Cu соответственно) и тем больше среднемировых фоновых концентраций (18 и 14 мг/кг для Ni и Cu соответственно).

Медленное очищение почв объясняется инерционностью происходящих процессов, и модель демонстрирует длительный период очищения почв от загрязнения. Необходимо отметить, что выщелачивание Ni и Cu может сильно зависеть от других загрязнений, в первую очередь от окислов серы. В модели в явном виде не учитываются влияние кислотных выпадений, прежде всего SO_2 , на мобилизацию металлов из почв, а также вторичные источники загрязнения, включая техногенные отвалы, хвостохранилища, однако они учитываются в модели косвенно, поскольку натурные данные 2023 г. выполнены при отсутствии локальных выбросов комбината «Печенганикель» и отражают квазистационарные условия выщелачивания и вымывания металлов, а также их поступления из вторичных источников загрязнения. Как результат снижения выбросов диоксида серы на Кольском полуострове (в том числе остановки комбината «Печенганикель») в динамике мониторинговых озер отмечается, что если в 1990-х годах было 34% озер, в воде которых среди анионов доминировали сульфаты, то к 2023 г. их было только 6%, а антропогенно-закисленные озера в период высоких выбросов в большинстве случаев восстановились к 2023 г. [26]. Более того, моделирование загрязнения атмосферы Арктической зоны России диоксидом серы в 1980—2050 гг. показывает, что за прошедшие 40 лет наблюдалась значительно выраженная тенденция снижения загрязнения, а по прогнозу до 2050 г. с учетом погодноклиматических факторов возможна тенденция повышения только при «жест-

ком» климатическом сценарии RCP8.5 [27]. При существенном снижении локальных источников выбросов загрязняющих веществ в будущем с учетом климатических изменений возможно влияние дальнего атмосферного переноса. В целом опасность в плане дальнего загрязнения атмосферы по прогнозу до 2050 г. могут представлять источники, расположенные южнее районов Арктической зоны России, а при «жестком» климатическом сценарии RCP8.5 эти тенденции в большинстве случаев выражены несколько сильнее [28].

Выводы

Остановка выбросов плавильного цеха комбината «Печенганикель» (которая произошла в декабре 2020 г.) не приведет к быстрому восстановлению и очищению природных сред. В отсутствие выбросов загрязняющих веществ наиболее быстрый отклик можно будет ожидать от их содержания в воде. Концентрации Ni и Cu будут обеспечиваться за счет выщелачивания и вымывания металлов из почв, причем с более интенсивным вымыванием Ni по сравнению с Cu. До начала работы комбинатов поступление из почв обеспечивало концентрации Ni и Cu менее 2 и 1 мкг/л соответственно, в то время как по прогнозу содержания Ni и Cu составят порядка 10 и 3 мкг/л до 2050 г., а их изменения в постэмиссионный период будут находиться в пределах точности моделирования. Вопреки ожиданиям для усредненного озера прогнозные концентрации в воде будут больше или равны предельно допустимым (10 и 1 мкг/л для Ni и Cu соответственно).

Наибольшей инерцией к восстановлению обладают почвы. В постэмиссионный период по прогнозу на 2050 г. содержание Ni и Cu составит 99 и 50 мг/кг соответственно, что значительно больше оценок региональных фоновых концентраций (26—37 и 16—19 мг/кг для Ni и Cu соответственно) и тем более среднемировых фоновых концентраций (18 и 14 мг/кг для Ni и Cu соответственно).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН и Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН.

Литература/References

1. Vareda J. P., Valente A. J. M., Durães L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *J. Environ. Manage.*, 2019, vol. 246, pp. 101—118. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.126.
2. Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide). *Environ. Rev.*, 2011, vol. 9, pp. 269—298. DOI: 10.1139/er-9-4-269.

3. Van Pelt R. S., Shekhter E. G., Barnes M. A. et al. Spatial and temporal patterns of heavy metal deposition resulting from a smelter in El Paso, Texas. *J. Geochem. Explor.*, 2020., vol. 210, p. 106414. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.106414.
4. Gunn J., Keller W., Negusanti J. et al. Ecosystem recovery after emission reductions: Sudbury, Canada. *Water, Air, Soil Pollut.*, 1995, vol. 85, pp. 1783—1788.
5. Narendrula R., Nkongolo K. K., Beckett P. et al. Total and bioavailable metals in two contrasting mining regions (Sudbury in Canada and Lubumbashi in DR-Congo): relation to genetic variation in plant populations. *Chem. Ecol.*, 2013, vol. 29 (2), pp. 111—127. DOI: 10.1080/02757540.2012.696617.
6. Kierczak J., Potysz A., Pietranik A. et al. Environmental impact of the historical Cu smelting in the Rudawy Janowickie Mountains (south-western Poland). *J. Geochem. Explor.*, 2013, vol. 124., pp. 183—194. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.09.008J.
7. Пичугин Е. А., Шенфельд Б. Е., Сомова Т. Н. Оценка воздействия объектов накопленного вреда в Арктике на компоненты природной среды // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 249—260. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-249-260. Pichugin E. A., Shenfeld B. E., Somova T. N. Assessment of the impact of accumulated harm objects in the Arctic on the natural environment components. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 249—260. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-249-260. (In Russian).
8. Евсеев А. В., Душкова Д. О., Горецкая А. Г. Биомониторинг аэротехногенного загрязнения экосистем Севера России тяжелыми металлами // Арктика: экология и экономика. — 2020. — Т. 39, № 3. — С. 23—33. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-23-33. Evseev A. V., Dushkova D. O., Goretskaya A. G. Biomonitoring of aerotechnogenic contamination of ecosystems in the North of Russia by heavy metals. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 3 (39), pp. 23—33. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-23-33. (In Russian).
9. Моисеенко Т. И., Мезгорский В. В., Гашкина Н. А. и др. Влияние загрязнения вод на здоровье населения промышленного региона Севера // Вод. ресурсы. — 2010. — Т. 37, № 2, pp. 194—203. — DOI: 10.1134/S0097807810020077. Moiseenko T. I., Megorskii V. V., Gashkina N. A. et al. Water pollution effect on population health in an industrial northern region. *Water Resources*, 2010, no. 37, pp. 194—203. DOI: 10.1134/S0097807810020077. (In Russian).
10. Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газозвоздушных выбросов комбината «Печенганикель» // Почвоведение. — 2014. — № 5. — С. 625—631. — DOI: 10.7868/S0032180X14050049. Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Korneykova M. V. The content and toxicity of heavy metals in soils affected by aerial emissions from the Pechenganickel plant. *Eurasian Soil Science*, 2014, no. 47 (5), pp. 504—510. DOI: 10.1134/S1064229314050044.
11. Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А. Формирование химического состава вод Мурманской области в условиях функционирования горнорудных и металлургических производств // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 4—13. Moiseenko T. I., Gashkina N. A. Formation of chemical composition of the waters of the Murmansk Region under the conditions of functioning of mining and metallurgical enterprises. *Arctic: Ecology and Economy*, 2015, no. 4 (20), pp. 4—13. (In Russian).
12. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Тр. КарНЦ РАН. — 2015. — № 9. — С. 62—75. Dauvalter V. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Trends in variations of heavy metal content in the bottom deposits of the Northern Fennoscandia lakes in last centuries. *Tr. KarNTs RAS*, 2015, no. 9, pp. 62—75. (In Russian).
13. Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Dinu M. I. et al. Water Chemistry of Arctic Lakes under Airborne Contamination of Watersheds. *Water*, 2020, vol. 12, p. 1659. DOI: 10.3390/w12061659.
14. Соколов А. В., Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А. и др. Моделирование и прогноз состояния природных сред в зоне воздействия медно-никелевого комбината: сбалансированная модель трансформации атмосферных выпадений на водосборе и в озере // Геохимия. — 2023. — Т. 68, № 6. — С. 737—749. — DOI: 10.31857/S0016752523060092. Sokolov A. V., Moiseenko T. I., Gashkina N. A. et al. Modeling and Predicting the Environment State in the Impact Area of a Copper-Nickel Plant: A Balanced Model of the Transformations of Atmospheric Deposition at the Catchment and in Lake. *Geochem. Int.*, 2023, no. 61 (7), pp. 768—779. DOI: 10.1134/S0016702923060095.
15. Sokolov A. V., Voloshinov V. V. Model Selection by Balanced Identification: The Interplay of Optimization and Distributed Computing. *Open Comput. Sci.*, 2020, vol. 10, pp. 283—295. DOI: 10.1515/comp-2020-0132.
16. <https://github.com/distcomp/SvF/tree/main/Examples/25-Kola-Pollution>.
17. Boyd R., Barnes S.-J., De Caritat P. et al. Emissions from the copper-nickel industry on the Kola Peninsula and at Noril'sk, Russia. *Atmos. Environ.*, 2009, vol. 43, pp. 1474—1480. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.003.
18. Tipping E., Rothwell J. J., Shotbolt L. et al. Dynamic modelling of atmospherically-deposited Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in Pennine catchments (northern England). *Environ. Pollut.*, 2010, vol. 158, pp. 1521—1529. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.12.026.
19. Nriagu J. O., Wong H. K. T., Lawson G. et al. Saturation of ecosystems with toxic metals in Sudbury basin, Ontario, Canada. *Sci. Total Environ.*, 1998, vol. 223, pp. 99—117. DOI: 10.1016/S0048-9697(98)00284-8.

20. Schindler M., Kamber B. S. High-resolution lake sediment reconstruction of industrial impact in a world-class mining and smelting center, Sudbury, Ontario, Canada. *Appl. Geochem.*, 2013, vol. 37, pp. 102—116. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2013.07.014.
21. Minolfi G., Jarva J., Tarvainen T. Humus samples as an indicator of long-term anthropogenic input — A case study from southern Finland. *J. Geochem. Explor.*, 2017, vol. 181, pp. 205—218. DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.06.024.
22. Рассеянные элементы в бореальных лесах. — М.: Наука, 2004. — 616 с.
Trace elements in boreal forests. Moscow, Nauka, 2004, 616 p. (In Russian).
23. Šillerová H., Chrástný V., Vítková M. et al. Stable isotope tracing of Ni and Cu pollution in North-East Norway: Potentials and drawbacks. *Pollut.*, 2017, vol. 228, p. 149e157. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.05.030.
24. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. — М.: ВНИРО, 2011. — 257 с.
Water quality standards for fishery water bodies, including norms of maximum permissible concentrations of toxic matters in fishery basins. Moscow, VNIRO, 2011, 257 p. (In Russian).
25. Alloway B. J. Sources of heavy metals and metalloids in soils. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. Dordrecht, Springer Netherlands, 2013, pp. 11—50. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7_2.
26. Моисеенко Т. И., Базова М. М. Озера Кольского Севера в условиях снижения антропогенных выбросов и потепления климата // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 193—203. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-193-203.
- Moiseenko T. I., Bazova M. M. Lakes of the Kola North in the context of declining man-made releases and global warming. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 193—203. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-193-203. (In Russian).
27. Макоско А. А., Матешева А. В., Лысова О. В. Исследование риска для растительных экосистем АЗРФ от загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата (в 1980—2050 гг.) // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 138—148. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-138-148.
- Makosko A. A., Matesheva A. V., Lysova O. V. Study of the risk for plant ecosystems of the Russian Arctic from atmospheric pollution in a changing climate (1980—2050). *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 138—148. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-138-148. (In Russian).
28. Макоско А. А., Матешева А. В. Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы Арктической зоны России в 1980—2050 гг. с учетом сценариев изменения климата // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 45—52. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-45-52.
- Makosko A. A., Matesheva A. V. Assessment of the long-range pollution trends of the atmosphere in the Arctic zone of Russia in 1980—2050 considering climate change scenarios. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 1 (37), pp. 45—52. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-45-52. (In Russian).

Информация об авторах

Гашкина Наталья Анатольевна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19), e-mail: ngashkina@gmail.com.

Соколов Александр Витальевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19); ведущий научный сотрудник, Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН (127051, Россия, Москва, Б. Каретный пер., д. 19, стр. 1), e-mail: alexander.v.sokolov@gmail.com.

Моисеенко Татьяна Ивановна, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, заведующий отделом, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19), e-mail: moiseenko.ti@gmail.com.

ASSESSMENT AND PREDICTION OF THE COPPER-NICKEL PRODUCTION IMPACT ON THE ECOLOGY OF THE KOLA NORTH: MODELING RESULTS

Gashkina, N. A.¹, Sokolov, A. V.^{1,2}, Moiseenko, T. I.¹

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

² Kharkevich Institute of Information Transfer Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

The article was received on March 24, 2026

For citing

Gashkina N. A., Sokolov A. V., Moiseenko T. I. Assessment and prediction of the copper-nickel production impact on the ecology of the Kola North: modeling results. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 419—429. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-419-429. (In Russian).

Abstract

The authors examine the results of modeling the dynamics of nickel and copper concentrations in soils, water, and bottom sediments of lakes located within the Pechenganikel smelter's footprint on the Kola Peninsula, and give a prediction of the rate of recovery and the state of natural environments by 2050, following the closure of the smelter in 2020. They have found that aquatic systems are more responsive to reduced anthropogenic loads, while soils exhibit the greatest inertia. According to the forecast, Ni and Cu high concentrations in lake water will be due to leaching from soils, where metal concentrations will be approximately three times higher than even the elevated regional background.

Keywords: *atmospheric deposition, nickel, copper, subarctic aquatic and terrestrial ecosystems.*

Funding

The research was carried out within the state assignment of the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences and Kharkevich Institute of Information Transfer Problems of the Russian Academy of Sciences.

Information about the authors

Gashkina, Natalia Anatolyevna, Doctor of Geography, Leading Researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (19, Kosygina St., Moscow, Russia, 119991), e-mail: ngashkina@gmail.com.

Sokolov, Aleksandr Vitalievich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (19, Kosygina St., Moscow, Russia, 119991), Leading Researcher, Kharkevich Institute of Information Transfer Problems of the Russian Academy of Sciences (19, Bldg. 1, B. Karetny Lane, Moscow, Russia, 127051), e-mail: alexander.v.sokolov@gmail.com.

Moiseenko, Tatyana Ivanovna, Doctor of Biological Science, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences, Head of Department, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (19, Kosygina St., Moscow, Russia, 119991), e-mail: moiseenko.ti@gmail.com.

© Gashkina N. A., Sokolov A. V., Moiseenko T. I., 2026