

УДК 628.81

ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОМБИНАТА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СБАЛАНСИРОВАННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

© 2023 г. А. В. Соколов^{1,*}, Н. А. Гашкина¹, член-корреспондент РАН Т. И. Моисеенко¹

Поступило 19.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принято к публикации 04.08.2023 г.

В статье рассматривается моделирование динамики концентрации никеля в почвах, воде и донных отложениях озер, вызванное выбросами в атмосферу комбината Печенганикель (Кольский полуостров) в течение всего периода его функционирования. Используется технология сбалансированной идентификации, которая позволяет на основе математического описания разнородных геохимических процессов, протекающих в экосистемах, объединить разнородные экспериментальные данные и построить компьютерную модель с оптимальным балансом сложности и близости к данным. Приводятся и обсуждаются результаты, в том числе оценки ретроспективного состояния моделируемых объектов и прогноз их динамики до 2030 г. По модельным расчетам интенсивность накопления Ni в почве составляла 2.4 и в 2 раза больше в донных отложениях в периоды максимальных выпадений (1980–2005 гг.), тогда как по прогнозу после остановки комбината начнутся снижение накопления Ni в донных отложениях и медленное выщелачивание Ni из почвы с интенсивностью 0.2 мг/м²год.

Ключевые слова: трансформация загрязнений, никель, субарктические водные и наземные экосистемы, сбалансированная идентификация, прогнозирование

DOI: 10.31857/S2686739723601667, **EDN:** TYUZWA

Стремительный рост численности населения на планете, экстенсивное вовлечение в эксплуатацию минерально-сырьевых ресурсов драматическим образом сказались на состоянии окружающей среды и привели к ряду серьезных экологических проблем. Наиболее сложной задачей является определение конечных целей восстановления с учетом пролонгированного влияния накопленного загрязнения и сопутствующих биогеохимических процессов на фоне происходящих климатических изменений. Практика экологического восстановления должна быть основана на законах фундаментальной науки – изучении многофункциональности и многообразия процессов, развивающихся в период восстановления [1]. Необходимо в первую очередь исследовать, как долго природные среды будут освобождаться от загрязнения с учетом длительного периода их накопления.

Функционирование медно-никелевых плавильных производств на Кольском Севере России привело к значительному загрязнению окружающей среды никелем, медью, кадмием и другими металлами. Диоксид серы и большая группа тяжелых металлов присутствовали в составе дымовых выбросов. Доказано, что тяжелые металлы, поступившие в окружающую среду и содержащиеся в воде, обладают высокой опасностью, как для животных, так и человека [2]. Экономический кризис 1990-х и последующая модернизация технологий привели к снижению потока тяжелых металлов в окружающую среду. В 2020 г. плавильные производства комбината “Печенганикель” остановили свою работу. Опыт Канады подтверждает [3], что значительное уменьшение выбросов в атмосферу (с 1970-х годов) не приводит к быстрому очищению почв от загрязнения тяжелыми металлами, поскольку проявляются вторичные эффекты перераспределения загрязнения в окружающей среде.

В представленной работе были рассмотрены малые озера в зоне распространения металлов с дымовыми выбросами, которые отражают антропогенное загрязнение. В основу модели легли данные, характеризующие поведение элементов

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: alexander.v.sokolov@gmail.com

(в нашем случае никеля (Ni)) в системе “водосбор–водоем”. Исследования были начаты в 1990–1995 гг. в рамках крупного проекта “Survey lakes” [4]. В этот период в проект были включены и работы на Кольском Севере России [5]. В объективе исследований и соответственно моделирования находились озера аэротехногенного загрязнения, не испытывающие каких-либо стоков.

Математическое моделирование последствий атмосферных загрязнений Кольского полуострова осуществляется несколько десятилетий. Для моделирования выпадения используются модели двух типов: модели, основанные на знаниях и модели, основанные на данных. В моделях первого типа используются сложные модели атмосферного переноса, а экспериментальные данные играют второстепенную роль (результаты применения таких моделей можно найти в [6]. Для их применения, помимо описания динамики атмосферы, необходимо задать значительное количество специальных коэффициентов, определяющих источники выбросов, многие из которых неизвестны. В моделях второго типа используются относительно простые модели выпадения, однако они строятся на основе большого объема специально собранных данных.

Разрабатываемая модель требует особых подходов и совсем иных исходных данных в отличие от вышеприведенных работ. Метод построения моделей сочетает преимущества обоих подходов — мы используем значительный объем разнородных (экспериментальных) данных и для него выбираем модель соответствующей сложности, содержащую (в виде различных уравнений и неравенств) современные знания о функционировании объекта исследования.

Целью работы являлась разработка модели “отклика” малых озер в зоне аэротехногенного загрязнения и не испытывающих никаких воздействий сточных вод, учитывающей геохимические процессы миграции элементов — от выпадений на водосборе, накопления и вымывания из почвы, осаждение в донных отложениях (ДО) и до удаления с естественным стоком из озера. Дать ретроспективные и прогнозные оценки выпадению металлов из загрязненной атмосферы по данным моделирования, последующего самоочищения водных систем после сокращения выпадений (на примере одного из основных загрязняющих элементов — Ni).

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методологической основой исследования является математическое моделирование, которое на основе объединения существующих знаний о

природных процессах и разнородного экспериментального материала, позволяет сделать выводы о прошлом, настоящем и будущем изучаемого объекта — природной среды в районе воздействия атмосферных выбросов комбината “Печенганикель”. Для этого используется технология сбалансированной идентификации. В качестве временного интервала моделирования предлагается выбрать диапазон с 1946 по 2030 г. Данные по выбросам имеются лишь с 1975 г., а интенсивное исследование последствий загрязнения (и, соответственно, поступление экспериментального материала) началось лишь в 90-х годах прошлого века.

До последнего времени построить по разнородным экспериментальным данным нелинейную распределенную модель динамики нескольких показателей было затруднительно. Появившееся специальное программное обеспечение и доступность мощных вычислительных ресурсов (кластеров) позволили создать технологию для решения задач такой сложности — технологию сбалансированной идентификации [7, 8]. Технология успешно использовалась при решении обратных задач в различных научных областях (механика, физика плазмы, теплопроводность, биология, физиология растений, эпидемиология, метеорология, перенос атмосферных загрязнений и др. [8]).

Использованные данные. В основу модели легли современные представления о функционировании экосистемы водосбора, включая озеро, и многочисленные натурные и экспериментальные данные. Были учтены систематические (с 1990 г. по 2018 г. с интервалом 4–5 лет) данные по состоянию 25 озер вокруг комбината (рис. 1). В процессе выполнения работы были привлечены опубликованные данные по атмосферным выбросам, выпадению, состоянию почв и ДО. Следует отметить, что используемые источники данных являются результатом различных исследований и проектов, слабо связанных между собой.

В результате анализа научной литературы по последствиям выбросов загрязняющих веществ в исследуемом регионе удалось собрать экспериментальные данные, связанные со всеми компонентами модели. Кратко перечислим используемые источники и обозначим их роль в построении модели.

Атмосферные выбросы загрязнений. Для вычисления выпадений Ni необходимы оценки выбросов: до 1997 г. данные взяты из [9], после — из формы № 2-тп (воздух).

Розы ветров. Для расчета переноса атмосферных загрязнений необходимо знать розы ветров для двух источников загрязнений в поселке городского типа Никель и г. Заполярный (<https://world-weather.ru/archive/russia/nikel/>, <https://world-weather.ru/archive/russia/zapolyarny/>).

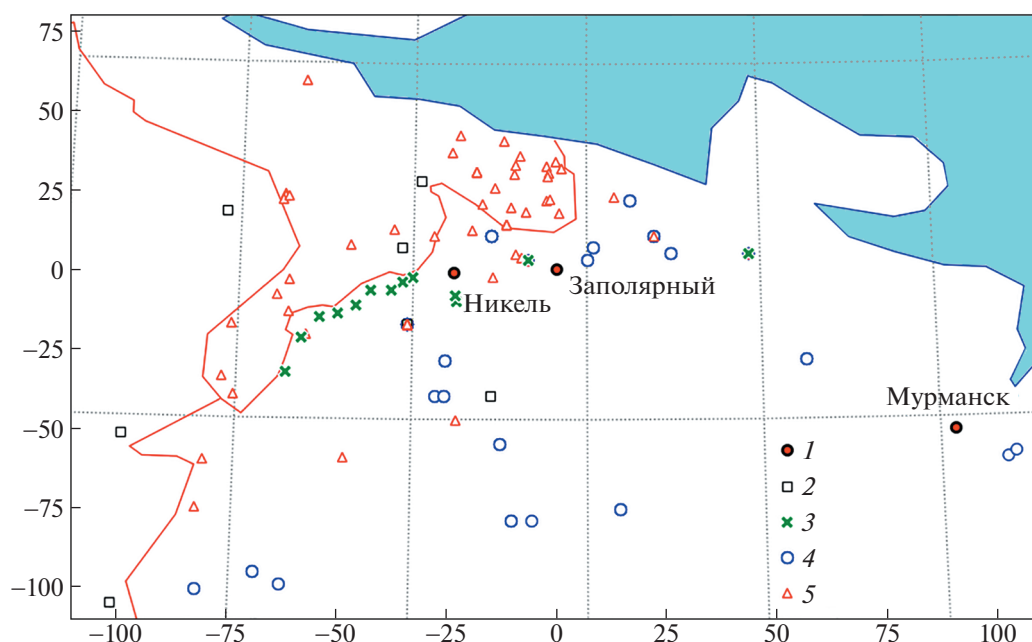


Рис. 1. Точки проведения исследований — 84 водосбора в зоне моделирования (влияния атмосферных выбросов комбината): 1 — источники выбросов, 2 — выпадения, 3 — почва, 4 — озера, 5 — донные отложения.

Выпадение (годовое поступление) — текущий (на данный момент) показатель выпадения. Имеется 8 точек за 2005 г. из отчета [10].

Почва — интегральный показатель выпадения, суммирует выпадения до момента проведения измерений. В работе используются данные по концентрации Ni: 4 точки за 2000 г. [11], 14 точек за 2014 г. [12] и 3 колонки, полученные нами в 2018 г. Фоновые значения берутся из нижнего горизонта.

Озера. Концентрации различных элементов (1990–2018) — быстрый (подвижный) показатель выпадения. Используются также площади водосбора и исследуемого озера. Это данные являются основой данного исследования (около 500 записей по озерам и времени), они собирались более двух десятилетий по единой методической схеме. Более подробное описание можно найти в [13, 14]. На данном этапе моделирования были выбраны 25 озер, которые попали в регион моделирования и для которых имеется много измерений в различные моменты времени (что существенно для описания временной динамики).

Поступление в донные отложения. Есть 2 точки по скорости аккумуляции осадков [15]: одна для 1956, 1976, 1986 г., другая для 1971 и 1986 г.

Донные отложения — интегральный показатель выпадения, слои с привязкой к временным интервалам, отражают выпадения за эти периоды. Имеются концентрации в верхнем слое — 50 озер для 1992 г. из [6]. Используются оценки скорости седиментации из [15]. Две колонки с датировкой из [16]. В исследование добавлены также новые

данные, полученные нами в 2018 г. для двух колонок ДО с датировкой.

На карте (рис. 1) приведены данные, связанные с последствиями атмосферных загрязнений комбината. Они используются для идентификации модели. Для моделирования предлагается выбрать регион с центром в г. Заполярный (именно здесь находится начало координат). В регионе находятся два источника атмосферных выбросов Ni: поселок городского типа Никель (металлургия) и г. Заполярный (горно-обогатительный комбинат). Всего рассматривается 84 водосбора. Суммарная площадь бассейнов — 2181 км². Суммарная площадь озер — 150 км².

Описание модели трансформации атмосферных загрязнений. Рассмотрим балансовую модель трансформации атмосферных выбросов Ni в почве, воде и ДО. Единицей моделирования является озеро с соответствующим водосбором (почвой). Модель описывает 2 источника выбросов и 84 (не взаимодействующих между собой) водосбора.

Каждый водосбор разбивается на две части: суша (площадь SQ_S) и озеро (площадь SQ_W). Начальный момент моделирования — 1946 г. Используемые обозначения расшифровываются в табл. 1.

1. Выпадение загрязняющих веществ от каждого источника. Предполагается мультипликативное представление функции.

Для источника в г. Никель (N):

$$D_N(t, \varphi_N, r_N) = P_N(t) \cdot R_N(r_N) \cdot FI_N(\varphi_N),$$

Таблица 1. Сокращения и единицы измерения

Сокращения	Расшифровка	Ед. изм.
t	Время	год
r	Расстояние от источника загрязнения до точки выпадения	км
φ	Угол направления от источника загрязнения до точки выпадения	град
$P(t)$	Мощность источника	т/год
$R(r)$	Зависимость интенсивности выпадения от r	1/м ²
$Fi(\varphi)$	Зависимость интенсивности выпадения от φ	—
D	Интенсивность выпадения (на единицу площади в единицу времени)	мг/м ² /год
$Dsol$	Интенсивность выпадения растворимой формы загрязнителя	мг/м ² /год
$Dinsol$	Интенсивность выпадения нерастворимой формы загрязнителя	мг/м ² /год
sol	Доля растворимой формы	—
$insol$	Доля нерастворимой формы	—
$S(t)$	Запас загрязнителя в почве в момент времени t	мг/м ²
$Snow$	Часть года со снежным покровом	—
$leach$	Выщелачивание: переход из нерастворимой в растворимую (результатом идентификации является $leach = 0.001$)	1/год
S_{fon}	Фоновые значения запасов	мг/м ²
$W(t)$	Концентрация загрязнителя в воде озера в момент времени t	мг/м ³
SQ_S	Площадь суши	м ²
SQ_W	Площадь озера	м ²
$precip$	Осадки	м/год
H	Условная глубина озера. Определяет интенсивность водообмена (результатом идентификации является $H = 1.2$)	м
$B(t)$	Ежегодное поступление загрязнителя в донные отложения в момент времени t Запас загрязнителя в слое t	мг/м ² год
B_{fon}	Фоновое ежегодное поступление загрязнителя в донные отложения	мг/м ² год

где r_N — расстояние от источника до водосбора и φ_N — соответствующее направление (полярные координаты).

Аналогично для источника в г. Заполярный:

$$D_Z(t, \varphi_Z, r_Z) = P_Z(t) \cdot R_Z(r_Z) \cdot FI_Z(\varphi_Z).$$

2. Для каждого водосбора выпадение загрязняющих веществ (в растворимой и нерастворимой форме) от двух источников суммируется:

$$Dsol(t) = D_N(t, \varphi_N, r_N) \cdot sol(r_N) + D_Z(t, \varphi_Z, r_Z) \cdot sol(r_Z)$$

$$Dunsol(t) = D_N(t, \varphi_N, r_N) \cdot unsol(r_N) + D_Z(t, \varphi_Z, r_Z) \cdot unsol(r_Z).$$

3. Динамика запасов (содержания) загрязнения в почве:

$$dS/dt = Dunsol(t) \cdot (1 - Snow) - leach \cdot S(t)$$

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

Предполагается, что в начальный момент запасы в почве соответствуют фоновым значениям,

что в почве остаются только нерастворимые формы, выпавшие в бесснежный период, что процесс выщелачивания переводит Ni в растворимую форму, которая выносятся из почвы в воду.

4. Динамика содержания (концентрации) загрязнения в воде озера

$$\begin{aligned} dW/dt = \\ = (Dsol(t) + leach \cdot S(t) \cdot SQ_S / (SQ_W + SQ_S) - \\ - precip \cdot W) / (H + precip). \end{aligned}$$

Предполагается, что все растворимые формы попадают в озеро вместе со всеми осадками ($precip = 0.40$ м/год), что все растворимые формы, образовавшиеся в почве в результате выщелачивания, добавляются в воду озера.

5. Донные отложения (по слоям):

$$B(t) = Dinsol(t) \cdot (1 + SQ_S / SQ_W) \cdot Snow + B_{fon}.$$

Предполагается, что слой ДО формируется из нерастворимых форм, попадающих непосредственно на поверхность озера, из нерастворимых

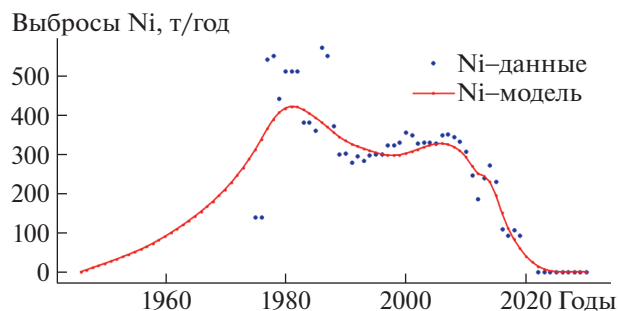


Рис. 2. Данные и результаты моделирования динамики атмосферных выбросов.

форм, попадающих непосредственно на сушу в зимний период (и попавших в озеро в половодье) и из фоновое значения, отражающее доиндустриальные процессы выветривания коренных пород и выщелачивания почв.

Модель содержит множество неизвестных функций, которые необходимо определить (идентифицировать) так, чтобы обеспечить баланс между близостью траектории модели к данным и сложностью модели. Для этого и используется технология сбалансированной идентификации. В настоящий момент доступна программная реализация технологии (<https://github.com/dist-comp/SvF>). Критерий идентификации и операторы, связывающие переменные модели с измерениями, здесь не приводятся. Эту информацию можно найти по ссылке <https://github.com/dist-comp/SvF/UseCases/4-Lakes>, где находится полная версия модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Приведем некоторые полученные результаты моделирования состояния водосборов, находящихся в зоне действия атмосферных выбросов комбината “Печенганикель”, на временном интервале 1946–2030 гг. Реальные данные имеются до 2019 г. (выбросы) — можно считать, что прогноз осуществляется с 2019 г. Основным предположением прогноза является полное прекращение атмосферных выбросов комбината с 2022 г.

Выбросы Ni. Исходные данные и результаты моделирования динамики атмосферных выбросов приводятся на рис. 2. Модельная кривая до 1975 г. — ретроспективные оценки выбросов. Данные с 2022 по 2030 г. — прогноз нулевых выбросов. Значения в первых двух точках оценочные и, по-видимому, сильно занижены.

Поступление и накопление Ni. Распределение выпадения Ni по составляющим: почва (суша), вода (озера) и ДО для среднего водосбора приведено на рис. 3 а. Около 40% ежегодного выпадения Ni поступает в ДО и приблизительно по 30% — в воду и в почву. Здесь и далее под средним водосбором будем подразумевать среднее по 84 водосборам, взвешенное по площади.

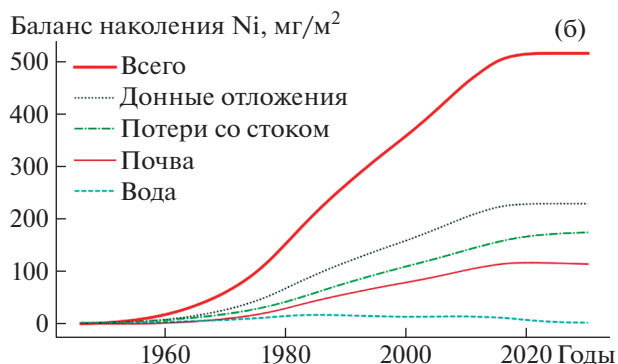
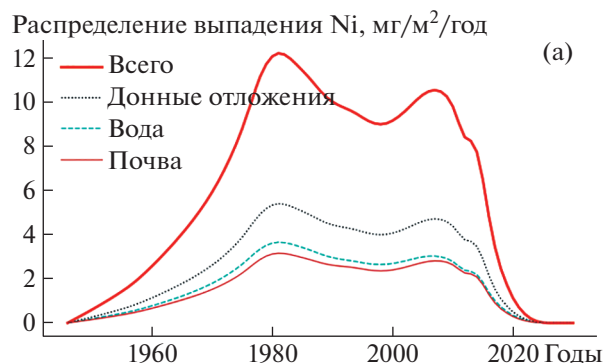


Рис. 3. (а) Распределение выпадения Ni. (б) Баланс накопления Ni.

ния Ni поступает в ДО и приблизительно по 30% — в воду и в почву. Здесь и далее под средним водосбором будем подразумевать среднее по 84 водосборам, взвешенное по площади.

Баланс накопления Ni по составляющим: почва (суша), вода (озера), ДО и потери со стоком для среднего водосбора на рис. 3 б показывает, что около 50% выпавшего Ni накапливается в ДО, 30% уходит со стоком и 20% накапливается в почве. Накоплением в воде можно пренебречь. С 2020-х годов потери со стоком только начинают отражаться на медленном снижении накопления в почве при стабилизации накопления в ДО.

Динамика концентрации Ni в воде и содержания Ni в почве. На рис. 3 а приведена динамика концентрации Ni в воде озер для среднего водосбора. Сравнение кривой на рис. 3 а с исходными данными и результатами моделирования динамики атмосферных выбросов (рис. 2) позволяет сделать вывод, что вода в целом отслеживает динамику ежегодного выпадения Ni и к 2030 г. прогнозируется возвращение к фоновым значениям.

Динамика содержания Ni в почве для среднего водосбора (рис. 3 б) демонстрирует накопление Ni до 2020 г. и затем медленное уменьшение вследствие процесса выщелачивания.

Динамика загрязнений в территориальном разрезе. На рис. 4 приведены результаты моделиро-

вания показателей загрязнения на всем регионе моделирования в различные моменты времени: 1995 г. — начало интенсивных исследований, 2005 г. — второй пик больших выбросов, 2018 г. — последний год интенсивных измерений; 2030 — конец прогноза. При расчетах использовали следующие предположения: начальная (1946 г.) концентрация Ni в воде равна 1 мг/м³, фоновое значение содержания Ni в почве равно 20 мг/кг (сух. веса), отношение площади водосбора к площади озера равно 15 : 1.

Представленные на рис. 4 выпадения Ni отражают максимальные выбросы в 1980-х годах, их увеличение после спада в 1990-х годах (2005 г.), их снижение (2018 г.) и их прекращение после 2021 г. Это качественно соответствует результатам расчетов, полученным ранее (для отдельного года) с помощью более сложных моделей атмосферного переноса [6].

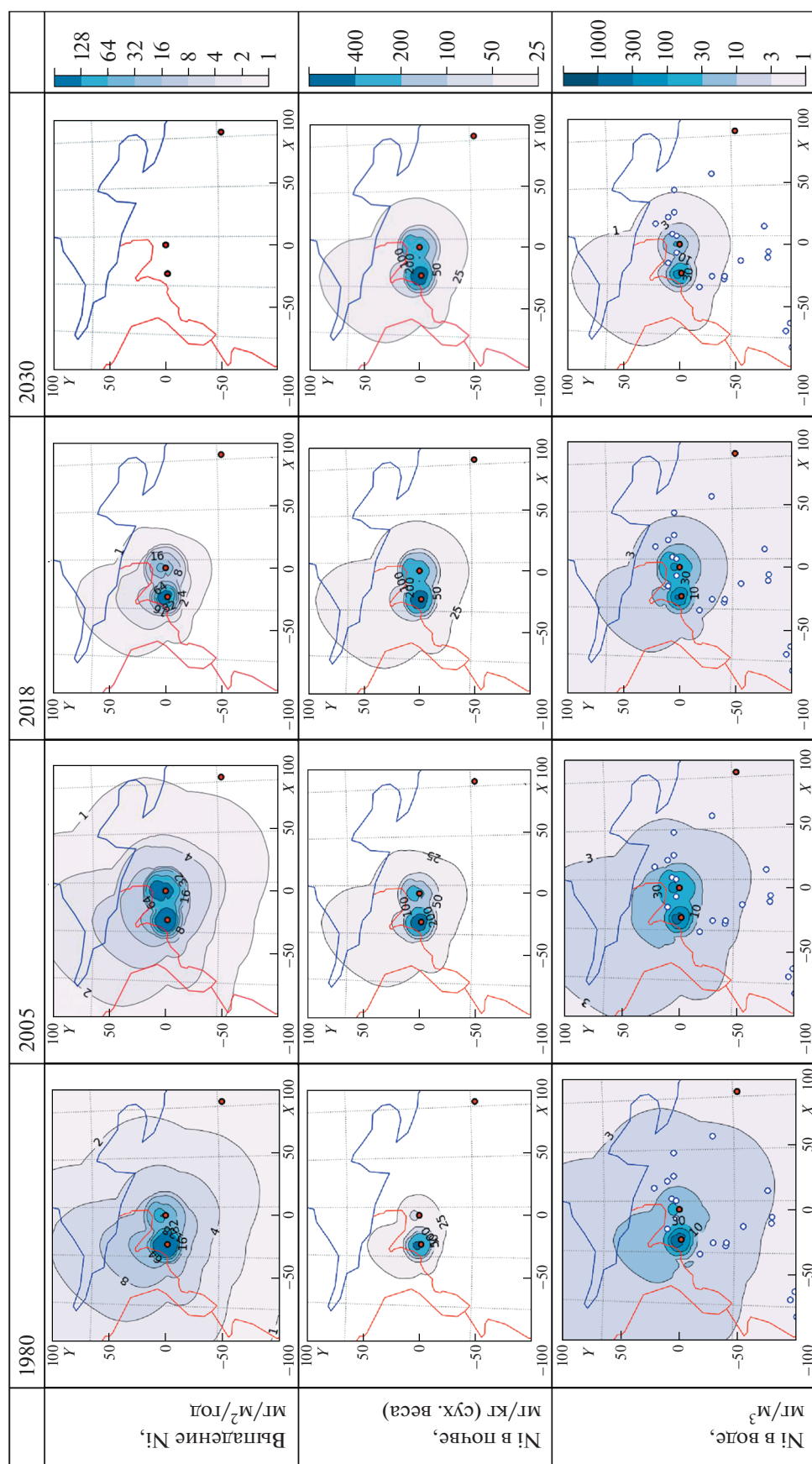
Территориальное накопление Ni в почве расширялось вплоть до 2018 г. (изолиния, близкая к фоновым значениям 25 мг/кг, достигла 50 км и более). Значительное загрязнение почв имеет ярко выраженный локальный характер и ограничивается 10-км зоной. Если сравнивать уровень загрязнения почв в Садбери, Канада (крупнейший в мире комплекс по выплавке никеля и меди), то максимальное накопление 300–1600 мг/кг наблюдалось в 15-км зоне, 120 мг/кг — на расстоянии 40 км, и выходило на фоновые значения 30 мг/кг уже на расстоянии более 90 км от плавильного комплекса [17]. Если реакция на снижение выпадений (2018 г.) и полное их прекращение (2021 г.) не отражается на накоплении Ni в почве, то отклики концентрации Ni в воде вполне ощутимы (рис. 4). Быстрая реакция вод на изменение характера и интенсивности выбросов наблюдалась и в Садбери, Канада: 1) с 1972 г. после закрытия плавильного завода в Конистоне) и строительства трубы высотой 381 м в Копер-Клиффе водные системы начали восстанавливаться без каких-либо дополнительных мер [18], 2) реакция качества вод также зафиксирована в первые несколько лет после ужесточения экологических норматив по выбросам в 1990-х годах [3].

Донные отложения в достаточной степени отражают хронологию интенсивности выпадений Ni. Согласно результатам моделирования (рис. 3), интенсивность накопления Ni в ДО была максимальной (4.5 мг/м²год) в период с первого по второй пик выпадений 1980–2005 гг., тогда как по прогнозу в период 2018–2030 гг. будет составлять лишь 0.2 мг/м²год. По данным одной из колонок, охватывающий весь исследуемый период, ДО оз. Кейноярви, расположенного в 15 км от комбината “Печенганикель”, отражают максимальное содержание 4187 мг/кг Ni в период 2000–2006 гг., фоновое доиндустриальное содержание

31 мг/кг и современное накопление 2545 мг/кг в 2012–2018 гг. (рис. 5). В Канаде донные отложения оз. Дейзи, расположенного в 5 км от плавильного завода в Конистоне, отражают максимальное накопление 4700 мг/кг в 40-е годы прошлого столетия до закрытия завода, тогда как донные отложения озер Сван и Тилтон, расположенных в 13 и 14 км от Копер-Клиффа, показывают максимальное накопление 1400–1800 мг/кг после строительства сверхдлинной трубы [19]. Подробный анализ (с толщиной слоев в 1 мм) колонки ДО оз. Вермиллион, расположенного примерно в 32 км к западу от центра города Садбери, свидетельствует о хорошем соответствии максимумов и минимумов накопления Ni в ДО с количеством его производства до введения экологических норм в 1990-х годах, однако современное накопление 245 мг/кг (2010 г) все еще высоко в сравнении с доиндустриальными концентрациями (39 мг/кг) в 1870-х годах, вероятно, из-за неатмосферного притока Ni с большого по размеру водосбора реки Вермиллион и дренажа хвостохранилищ [20].

Что касается почвы, то биогеохимические процессы здесь замедлены в силу низких температур. В период полярной зимы почва находится в замерзшем состоянии и выпавшие из атмосферы металлы накапливаются в снежном покрове и в период весеннего половодья стекают в реки и озера по замерзшей почве. В период короткого лета Ni, поступивший с атмосферными выпадениями на подстилающую поверхность, задерживается в почвах в период вегетации и прочно закрепляется в их верхнем органогенном слое (до 90%). Например, более 100 лет работы комплекса в Садбери значительно отразилось только накоплением в 5-см органогенном слое почв [17]. Медленное очищение почв объясняется инерционностью происходящих здесь процессов в почвах, что учтено в модели — она так же демонстрирует длительный период очищения почв от загрязнения. По модельным расчетам (рис. 3) интенсивность накопления Ni в почве составляла 2.4 мг/м²год в периоды максимальных выпадений (1980–2005 гг.), тогда как по прогнозу после остановки комбината начнется медленное выщелачивание Ni из почвы с интенсивностью 0.2 мг/м²год. Необходимо отметить, что выщелачивание Ni может сильно зависеть от других загрязнений, в первую очередь от окислов серы.

Поверхностные воды — более лабильный компонент природной системы “водосбор—озеро” и здесь наблюдается более стремительное повышение концентраций Ni в ответ на нарастание выбросов в атмосферу, которое достигло максимума к 1980-м гг. Быстрая реакция вод на снижение выпадений констатировалась и в водных системах в районе Садбери [3, 19]. Возможно, в той или иной степени на поток металлов в озера могут

Рис. 4. Динамика загрязнений Ni в территориальном разрезе.

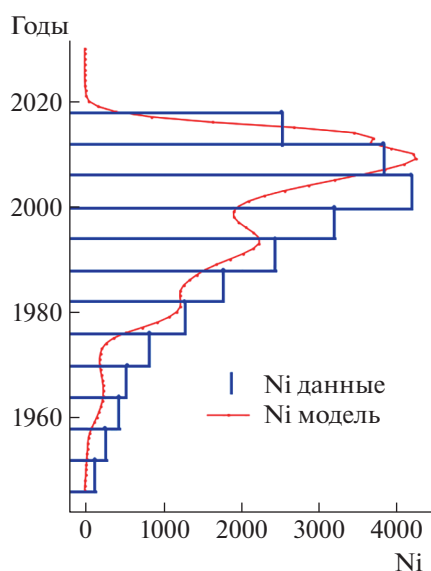


Рис. 5. Колонка донных отложений Ni (мг/кг сух вес) и модельная кривая.

влиять процессы десорбции металлов из почв на водосборах, которые даже в случае отсутствия выпадений, в той или иной степени могут поступать с водосбора. Однако большая часть из них входит в состав органоминеральных комплексов и слабо высвобождается, как показывает опыт исследований озер вокруг плавильни в Садбери. Относительно диффузии из ДО то в малых арктических озерах, питание которых на 70% обеспечено атмосферными выпадениями, воды озер практически сохраняют высокое насыщение придонных горизонтов кислородом, поэтому окислы металлов осаждаются и захораниваются в ДО [16], диффузия металлов из ДО пока мало влияет на концентрацию металлов в толще вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная на основе технологии сбалансированной идентификации модель продемонстрировала эффективность для реконструкции прошлого и прогноза состояния природных сред на водосборе в системе “атмосферные выпадения—почвы—воды суши”. На ее основе было предсказано, что остановка выбросов плавильного цеха комбината “Печенганикель” (которая произошла в декабре 2020 г.) не приведет к быстрому восстановлению и очищению природных сред от Ni, как одного из основных загрязняющих элементов. Наибольшей инерцией к восстановлению обладают почвы. Более быстрый ответ можно ожидать от концентрации Ni в воде — при отсутствии выбросов главным источником поступления будет являться выщелачивание накопленных в почве и ДО загрязнений. По модельным расчетам интен-

сивность накопления Ni в почве и ДО составляла 2.4 и 4.5 мг/м²год в периоды максимальных выпадений (1980–2005 гг.), тогда как по прогнозу после остановки комбината начнется снижение интенсивности накопления Ni в ДО (0.2 мг/м²год) и медленное выщелачивание Ni из почвы (0.2 мг/м²год).

Преимущество представленной модели заключается в том, что она отражает полную картину происходящих процессов: структуру преобразования атмосферного загрязнения на всей исследуемой территории, балансовую оценку миграционных потоков и накопление загрязнения, территориального его распределения и прогноз состояния всех сред экосистемы в будущем.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено с использованием оборудования центра коллективного пользования “Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса” НИЦ “Курчатовский институт”, <http://ckp.nrcki.ru/>. Исследования выполнены в рамках Госзадания ГЕОХИ РАН № FMUS-2019-0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strobl K., Kollmann J., Teixeira L.H. Integrated assessment of ecosystem recovery using a multifunctionality approach // *Ecosphere*. 2019. V. 10. P. e02930.
2. Моисеенко Т.И., Мегорский В.В., Гашкина Н.А., Кудрявцева Л.П. Влияние загрязнения вод на здоровье населения индустриального региона севера // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37. № 2. С. 194–203.
3. Nriagu J.O., Wong H.K.T., Lawson G., Daniel P. Saturation of ecosystems with toxic metals in Sudbury basin, Ontario, Canada // *Sci. Total Environ.* 1998. V. 223. P. 99–117.
4. Kvaeven B., Ulstein M.J., Skjelkvåle B.L. ICP Waters - An international program for surface water monitoring // *Water Air Soil Pollut.* 2001. V. 130. P. 775–780.
5. Skjelkvåle B.L., Andersen T., Fjeld E., Mannio J., Wilander A., Johansson K., Jensen J.P., Moiseenko T. Heavy Metals in Nordic Lakes; Concentrations, Geographical Patterns and Relation to Critical Limits. *AMBIO*. 2001. V. 30. P. 2–10.
6. Rognerud S., Norton S.A., Dauvalter V. Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. NIVA-Report 522/93. Oslo, Norway: NIVA, 1993. 18 p.
7. Соколов А.В., Волошинов В.В. Выбор математической модели: баланс между сложностью и близостью к измерениям // *International Journal of Open Information Technologies*. 2018. V. 6. № 9. P. 33–41.
8. Sokolov A.V., Voloshinov V.V. Model Selection by Balanced Identification: the Interplay of Optimization and Distributed Computing // *Open Comput. Sci.* 2020. V. 10. P. 283–295.

9. *Кашулина Г.М.* Аэротехногенная трансформация почв европейского субарктического региона. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с.
10. Current State of Terrestrial Ecosystems in the Joint Norwegian, Russian and Finnish Border Area in Northern Fennoscandia. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 85 (Eds. Derome J., Myking T., Aarrestad P.A.). Helsinki, Finland: Finnish Forest Research Institute, 2008. 98 p.
11. Рассеянные элементы в бореальных лесах. Под ред. Исаева А.С. М.: Наука, 2004. 616 с.
12. *Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П., Корнейкова М.В.* Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия газовой воздушных выбросов комбината “Печенганикель” // Почвоведение 2014. № 5. С. 625–631.
13. *Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y.* Water Chemistry of Arctic Lakes under Airborne Contamination of Watersheds // Water. 2020. V. 12. P. 1659.
14. *Гашкина Н.А., Моисеенко Т.И.* Пространственно-временные закономерности изменения химического состава вод озер под влиянием выбросов медно-никелевых производств: прогноз закисления // Геохимия. 2016. № 12. С. 1122–1137.
15. *Norton S.A., Appleby P.G., Dauvalter V., Traaen T.S.* Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment. NIVA-Report 41/1996. Oslo, Norway: NIVA, 1996. 18 p.
16. *Даувальтер В.А., Кашулин Н.А., Денисов Д.Б.* Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды КарНЦ РАН 2015. № 9. С. 62–75.
17. *Narendrula R., Nkongolo K.K., Beckett P., Spiers G.* 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. V. 29. P. 111–127.
18. *Gunn J., Keller W., Negusanti J., Potvin R., Beskett P., Winterhalder K.* Ecosystem recovery after emission reductions: Sudbury, Canada // Water, Air, Soil Pollut. 1995. V. 85. P. 1783–1788.
19. *Tropea A.E., Paterson A.M., Keller W., Smol J.P.* Sudbury sediments revisited: evaluating limnological recovery in a multiple-stressor environment // Water, Air, Soil Pollut. 2010. V. 210. P. 317–333.
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. V. 37. P. 102–116.

PREDICTION OF ENVIRONMENT STATE IMPACT IN AREA OF A COPPER-NICKEL PLANT ON THE BASIS OF BALANCED IDENTIFICATION TECHNOLOGY

A. V. Sokolov^{a, #}, N. A. Gashkina^a, and Corresponding Member of the RAS T. I. Moiseenko^a

^a*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: alexander.v.sokolov@gmail.com*

The article deals with modeling the dynamics of nickel concentration in soils, water and bottom sediments of lakes, caused by emissions into the atmosphere of the Pechenganickel plant (Kola Peninsula) during the entire period of its operation. The technology of balanced identification is used, which allows, based on a mathematical description of heterogeneous geochemical processes occurring in ecosystems, to combine heterogeneous experimental data and build a computer model with an optimal balance of complexity and closeness to data. The results are presented and discussed, including estimates of the retrospective state of the simulated objects (before the start of intensive studies) and a forecast of their dynamics until 2030. According to model calculations, the intensity of Ni accumulation in soil was 2.4 and 2 times higher in bottom sediments during maximum precipitation periods (1980–2005), while according to the model forecast, after the shutdown of the plant, Ni accumulation in bottom sediments will begin to decrease and Ni will slowly leach from the soil with an intensity of 0.2 mg/m² year.

Keywords: pollution transformation, nickel, subarctic water and terrestrial ecosystems, balanced identification, prediction