

ОЗЕРА КОЛЬСКОГО СЕВЕРА В УСЛОВИЯХ СНИЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Т. И. Моисеенко, М. М. Базова

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

Статья поступила в редакцию 15 октября 2025 г.

Для цитирования

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.

Представлены результаты исследований биогеохимии озер в условиях снижения выбросов медно-никелевых производств и наблюдаемого потепления климата на Кольском Севере России. Показаны основные изменения гидрохимии озер за последние 25 лет (с 1998 по 2023 гг.). Дается характеристика особенностей развития антропогенно-индуцированных процессов, таких как эвтрофирование, закисление и токсичное загрязнение металлами в условиях изменяющегося климата. Показано, что водные системы эволюционируют при снижении загрязнения и под влиянием потепления климата в новое состояние, отличное от природных показателей. Обосновываются критерии диагностики неблагоприятных процессов в водах Крайнего Севера.

Ключевые слова: арктический бассейн, воды суши, эвтрофирование, закисление, токсичное загрязнение, критерии оценки.

Введение

Поверхностные воды суши являются компонентом природы, сознательные преобразования или попутные изменения которого в результате человеческой деятельности наиболее существенны. Анализ имеющихся научных материалов по оценке состояния озер арктического бассейна выявил низкую степень их изученности. Мониторинг качества вод арктического бассейна, как правило, осуществляется на крупных водных объектах или приемниках сточных вод, концентрируется на измерении содержания отдельных компонентов загрязнения без учета всего комплекса биогеохимических процессов, протекающих в водных объектах арктического бассейна [1].

Следует отметить, что на территории арктического региона находятся более 11 тыс. малых озер, которые подвержены воздействию атмосферных выпадений, а также ряд крупных озер, которые испытывали воздействие сточных вод. Крупнейшее из них озеро Имандра с 1940-х годов подвергалось влиянию сточных вод [2]. На примере многолетних изменений доказано, что в водах суши этой зоны развиваются антропогенно-индуцированные процессы (эвтрофирование, закисление, появление токсичных элементов), которые способны привести к негативным изменениям качества вод [3; 4]. Намечившееся снижение поступления загрязнения происходило на фоне потепления климата.

Целью исследования было дать характеристику особенностей формирования химического состава

ва вод и определить долговременные тенденции изменения качества вод на примере озера Имандра и более 100 малых озер в условиях снижения антропогенных воздействий и потепления климата, разработать критериальную систему для ранней диагностики неблагоприятных процессов в водах суши (на примере Кольского региона). Очевидно, что освоение природных ресурсов арктического бассейна будет продолжаться. Поэтому обобщение результатов исследований и литературных источников на основе исследований Кольского региона будет востребовано при промышленном освоении новых регионов Крайнего Севера.

Материалы и методы исследования

Природные характеристики и уязвимость вод арктического бассейна

Климатические условия Арктики определяют ряд специфических особенностей формирования качества вод суши, обуславливающих их уязвимость антропогенными воздействиями.

Формирование поверхностного стока на Кольском Севере в условиях избыточного увлажнения обуславливает низкую минерализацию и преимущественно олиготрофный характер природных вод, так как коренные породы мало выщелачиваются, четвертичные отложения сильно перемыты, почвенный покров тонок. Низкие среднегодовые температуры воздуха ослабляют процессы водной эрозии, следствием которых является низкая минерализация вод суши; неразвитость почвенного покрова делает геохимический состав подстилающих пород определяющим фактором в формировании химического состава поверхностных вод. Слабое развитие растительности и тонкий почвенный покров обеспечивают высокий дренаж выпадающих осадков. Следствием преобладания выпадений над испарением и замедленных процессов минерализации органического вещества является наличие большого количества верховых мелких заболоченных озер с высоким содержанием гумуса и природно-кислыми водами, так называемых *Wetland pond*. В целом воды Кольского региона в природном состоянии характеризуются низкой минерализацией и малыми содержаниями биогенных элементов. Встречаются дистрофные озера с высоким содержанием гумусовых кислот. Крупные озера арктического бассейна в природном состоянии ультрапресные и олиготрофные с высокой прозрачностью вод.

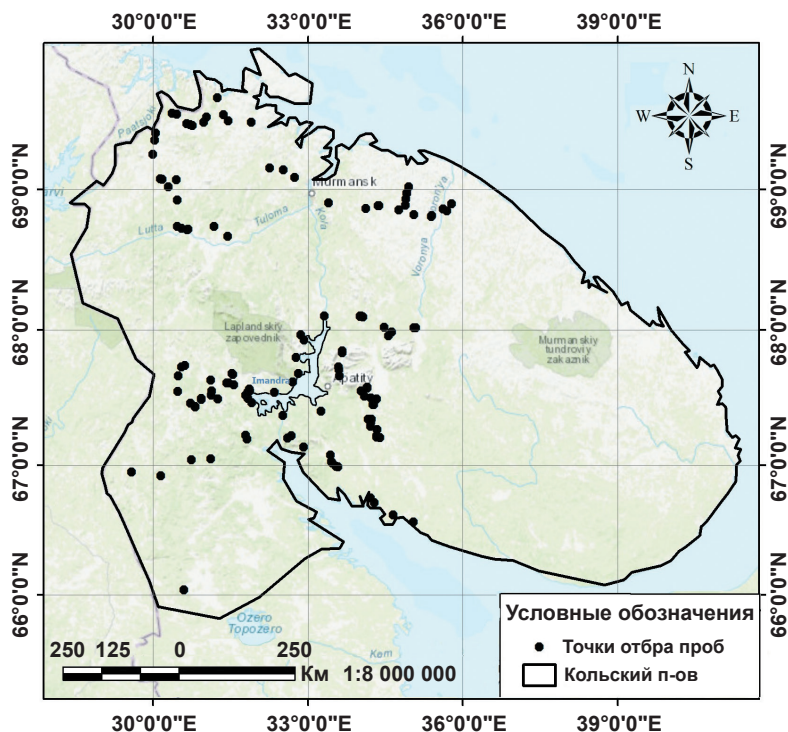


Рис. 1. Карта-схема точек исследованных озер Кольского Севера
Fig. 1. Map of the surveyed lakes of the Kola Peninsula

Антропогенное воздействие и изменение климатических условий

Нарастание антропогенной нагрузки на природные комплексы Кольского Севера шло с 1930-х до 1980-х годов параллельно увеличению мощности горно-перерабатывающих производств. Загрязнение водных объектов достигло максимума в 1980—1990 гг. Приостановка деятельности производств и модернизация технологий привели к сокращению объемов сброса сточных вод в водоемы и выбросов в атмосферу, с 2021 г. была остановлена выплавка руд в поселке Никель. На рис. 2 представлены данные о выбросах в атмосферу со стороны медно-никелевых производств, которые значительно снизились. По сравнению с 1990 г. интенсивность выпадений SO_2 к 2000 г. снизилась вдвое (с 3013 до 1630 т/год), к 2010 г. — еще вдвое (до 653 т/год), а к 2023 г. — до 58 т/год. К 2010 г. концентрация Cu также снизилась вдвое, а концентрация Ni почти не изменилась. К 2010—2018 гг. отмечена стабилизация концентраций Ni и Cu после их уменьшения в предыдущие годы и далее резкое снижение к 2023 г.: 6,7 т/год Ni и 12,8 т/год Cu [5].

Для оценки климатических изменений были использованы данные по среднемесячной температуре воздуха в вегетационный период за 33-летний период наблюдений (с июня по сентябрь) по четырем станциям: в поселке городского типа Никель на северо-западе региона, в поселке Териберка на побережье Баренцева моря, в городе Апатиты в центре региона и в поселке городского типа Умба на

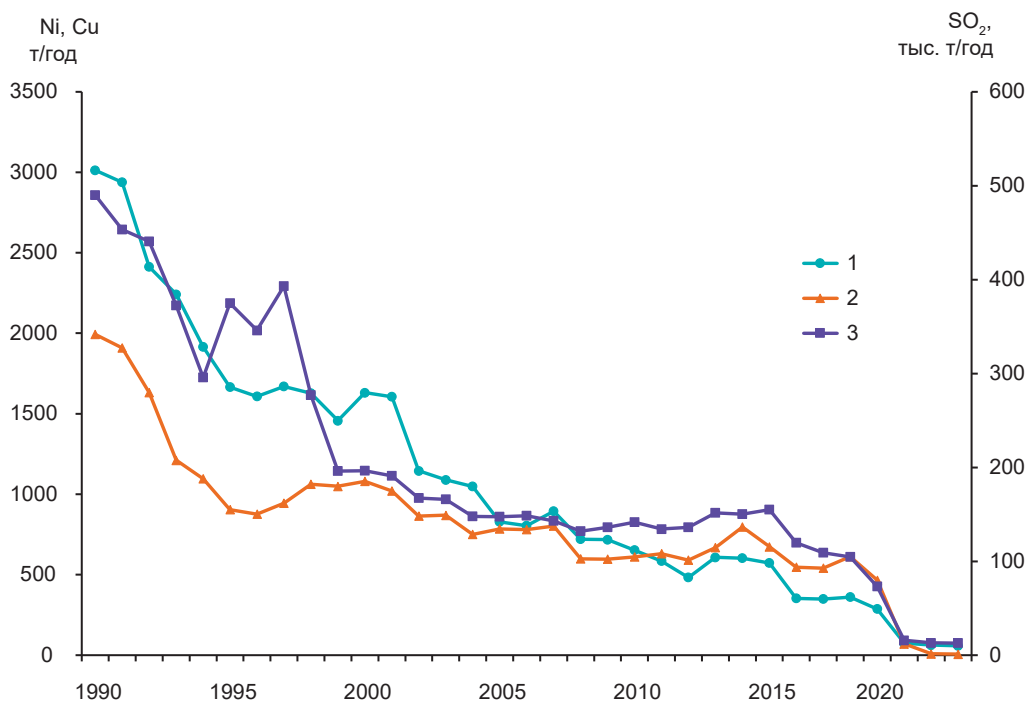


Рис. 2. Выбросы в атмосферу: 1 – Ni, 2 – Cu, 3 – SO₂ [5] в 1990–2023 гг.
Fig. 2. Emissions into the atmosphere: 1 – Ni, 2 – Cu, 3 – SO₂ [5] in 1990–2023

побережье Белого моря (рис. 3) [6]. В среднем температура воздуха в период открытой воды за этот период повысилась на 2,5°C (с 9,9°C до 12,4°C). При высокой вариабельности температур воздуха виден достоверный тренд повышения температуры в период открытой воды ($r = 0,60, p < 0,05$) за последние 30 лет. Эти данные свидетельствуют о наметившей-

ся тенденции к повышению температуры вследствие глобального потепления климата.

Снижение загрязнения озера Имандра: восстановление или эволюция?

На примере озера Имандра в многолетнем ряду наблюдений показано распространение никеля (рис. 4) в 1998 и 2023 гг. как маркера токсичного

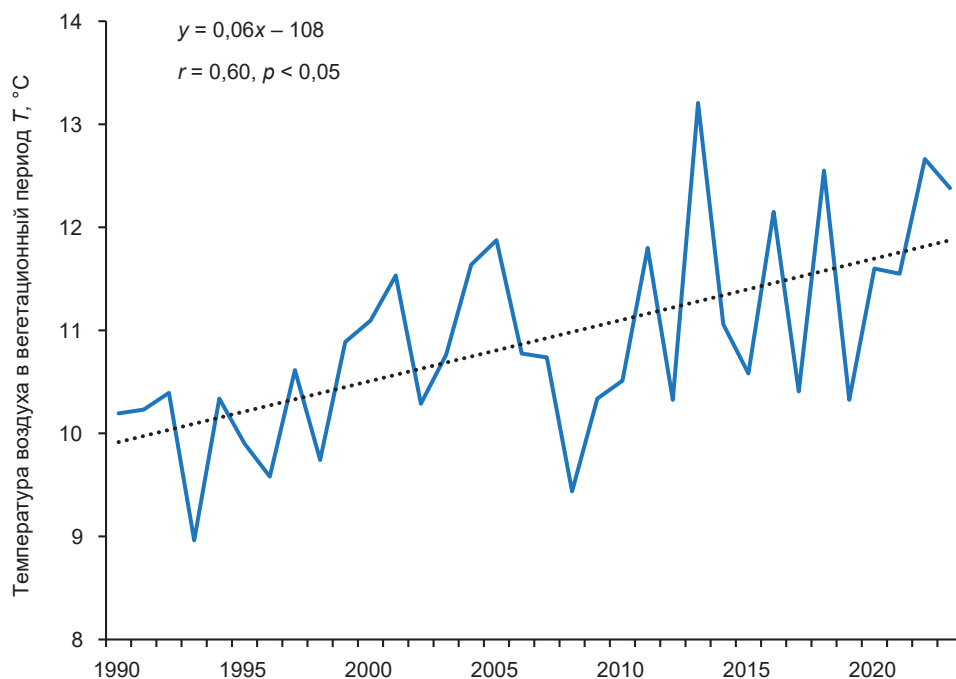


Рис. 3. Среднемесячные температуры приземного слоя воздуха в период открытой воды с 1990 по 2023 гг., °C [6]
Fig. 3. Average monthly temperatures of the surface air layer during the open water period, from 1990 to 2023, °C [6]

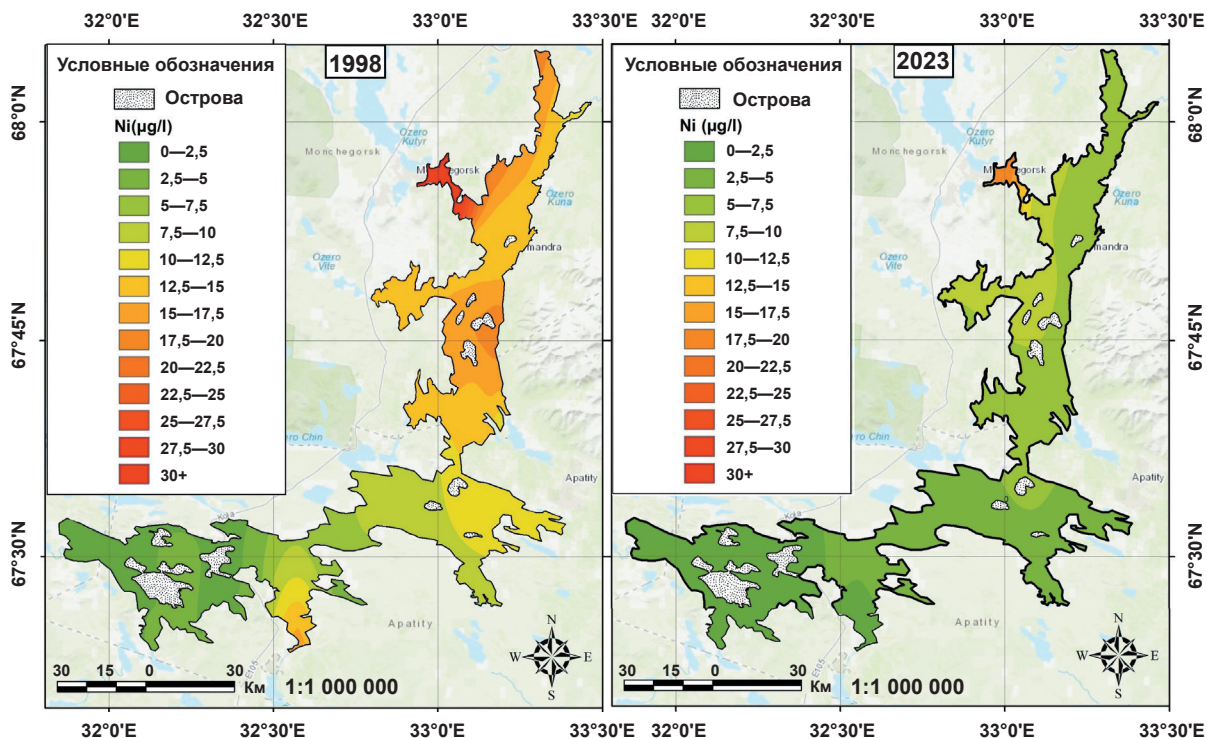


Рис. 4. Изменение концентраций никеля в приповерхностном слое вод озера Имандра за последние 25 лет
 Fig. 4. Changes in nickel concentrations in the surface layer of Lake Imandra over the past 25 years

загрязнения вод. Наряду с сокращением загрязнения озера металлами увеличилось содержание биогенных элементов — азота и фосфора. На рис. 5 представлено повышение содержаний фосфора за

25-летний период. В 1970—1980-е годы, как отмечалось, загрязнение озера было более высоким. Массовые заболевания сигов наблюдались в этот период и детально описаны в [7]. Здесь впервые

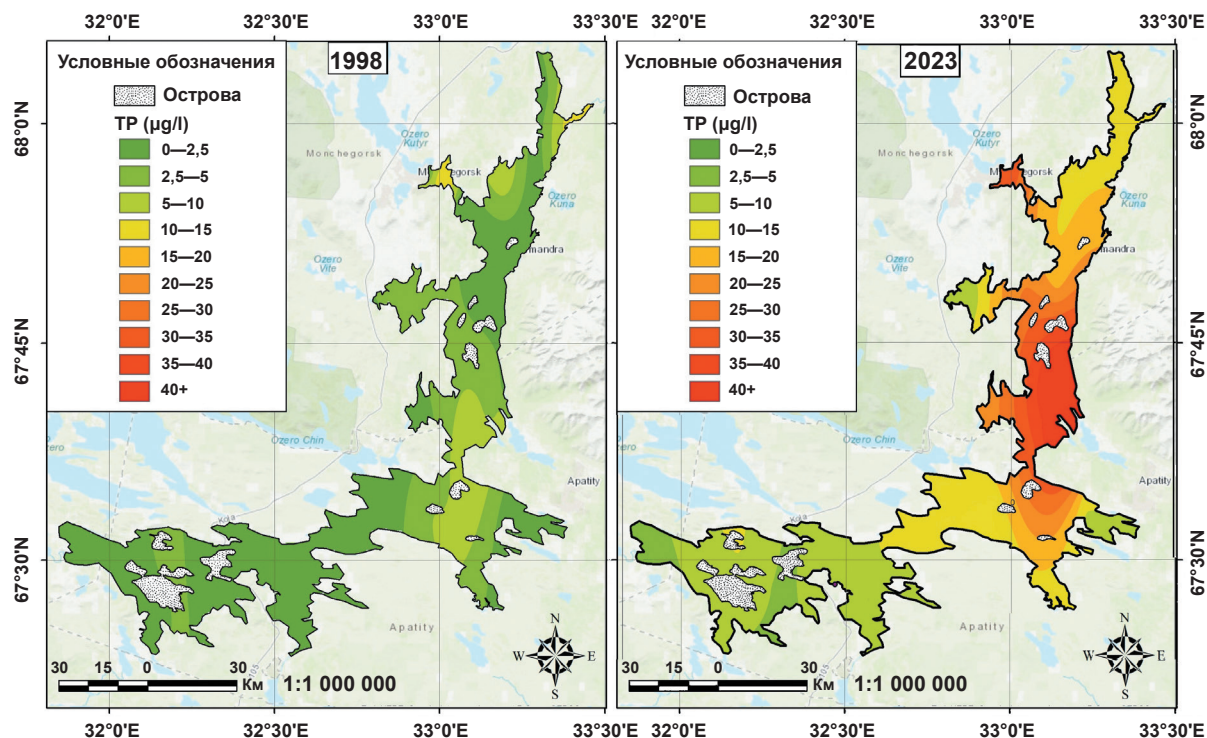


Рис. 5. Изменение концентраций общего фосфора P_{tot} в приповерхностном слое вод озера Имандра за 25 лет
 Fig. 5. Changes in total phosphorus P_{tot} concentrations in the surface layer of Lake Imandra over 25 years

была диагностирована почечнокаменная болезнь рыб, которая была обусловлена высокими накоплениями никеля и других металлов в организме рыб.

Выделим основные изменения экосистемы озера Имандра от прежних природных показателей через критическое состояние к новому устойчивому положению [2]:

- накопленные биогенные элементы азот и фосфор включились в биогеохимические циклы и пищевые цепи, что привело к более высокой продуктивности экосистемы;
- в экосистеме появились интродуценты, не свойственные северо-арктическому комплексу фауны;
- возросла роль малых форм в экосистеме (фито- и зоопланктон, бентос);
- озеро из сигово-гольцового с наличием озерной кумжи трансформировалось в сигово-корюшковый водоем с наличием озерного окуня;
- вновь сформированные сообщества приобрели стабильность в условиях более высокого притока биогенных элементов и их включения в биогеохимические циклы озера.

Из приведенных материалов видно, что экосистема озера Имандра эволюционировала в новое качественное состояние. Возникает логичный вопрос: возможно ли восстановление экосистемы до природных показателей?

Развитие новой модификации водной экосистемы после снижения токсичного загрязнения согласуется с закономерностями сукцессий экосистем: от природной через критическую стадию к более стабильной модификации, но отличной по структуре от природной. Поэтому термин «восстановление экосистем» в данном случае нельзя отождествлять с понятием возвращения к природному состоянию, скорее он может трактоваться как эволюция экосистемы в новое устойчивое состояние [8]. По мнению ученых, основной целью улучшения состояния природных объектов должно быть поддержание основных показателей структуры и функций экосистемы, т. е. высокого качества вод и ее биопродуктивности [9].

Малые озера и закисление вод

Проблема закисления вод актуальна для европейского Севера, где наряду с локальными источниками эмиссии антропогенной серы оказывает воздействие трансграничный перенос загрязненных воздушных масс из Европы. В 1990 г. Россия на примере Кольского Севера впервые включилась в эксперимент по оценке последствий воздействия аэротехногенного загрязнения на воды суши (проект «Survey Lakes») по единой методологии с другими северными странами. Исследования проводились с периодичностью каждые пять лет [10].

Интенсивность закисления определяется двумя условиями: уровнем антропогенной нагрузки с учетом фактора продолжительности действия и природной чувствительностью территории. Локаль-

ми источниками поступления кислотообразующих веществ в атмосферу являются металлургические предприятия, а также тепловые станции, использующие уголь. Выпадение антропогенной серы в индустриальных центрах превышало 2 гS/(м²·год), а на трети территории — 1 гS/(м²·год). В последние годы (с 2015 г.) эмиссия антропогенной серы значительно снизилась — до 0,37 гS/(м²·год) [11]. Геологические условия региона, а именно их буферная емкость, являются важным параметром, определяющим интенсивность закисления вод. На большей части Кольского региона развиты гранитогнейсовые формации, которые предопределили развитие закисления вод в регионе.

Симптомом закисления вод является не только снижение pH воды (это уже следствие), но и нарушение ионного равновесия вследствие геохимических преобразований водосборов. Показатель кислотнейтрализующей способности (ANC) — наиболее распространенный критерий закисления вод [12]. Он может быть рассчитан по формуле

$$ANC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+} - SO_4^{2-} - NO_3^{-}. \quad (1)$$

На примере Кольского Севера доказано, что закисление вод в северных широтах проявляется: а) в снижении pH малых озер преимущественно автономных ландшафтов; б) в появлении кислотных эпизодов в период половодья на малых ручьях; в) в снижении буферной емкости крупных водосборов. Снижение эмиссии кислотообразующих газов в последние годы привело к восстановлению закисленных вод [13]. В целом в озерах, исследованных с 1990 г. раз в 4—5 лет, к 2023 г. достоверно снизилось содержание техногенных сульфатов SO_4^* с 87 до 33 мкмоль-экв/л по медианным значениям (определенных после коррекции на устранение морских аэрозолей по формуле $SO_4^* = SO_4^{2-}_{общ} - 0,103[Cl^-]$) [14]. Показатель ANC возрос (по медианным значениям) с 89 до 280 мкмоль-экв/л. Минимальные значения также возросли, но озера остались в категории водоемов с критически низкими значениями (ANC от -23 до 11 мкмоль-экв/л). В 1990-х годах было отмечено 34% озер, в воде которых среди анионов доминировали сульфаты, к 2010 г. их количество снизилось до 25%, к 2023 г. — до 6%. Для всех исследованных озер за 33-летний период снижение концентраций SO_4^* подтверждается достоверным непараметрическим статистическим коэффициентом теста Кендалля (SKT = -5,85, $p < 0,001$). Кислотнейтрализующая способность вод увеличилась в ответ на снижение содержания SO_4^* , причем наблюдалось достоверное увеличение ANC для всей популяции озер: SKT = +7,15, $p < 0,001$ (рис. 6).

На рис. 7 показаны закисленные озера в 2010 г., которые восстановились к 2023 г. Несмотря на уже намечившееся в 2010 г. снижение выбросов техногенных сульфатов, до настоящего времени (2023 г.) сохраняются закисленные озера (11%), которые приурочены к гранитогнейсовым формациям. Это

Рис. 6. Распределение SO_4^* и ANC в воде озер Кольского региона за период с 1990 по 2023 г. Тест Манна – Кендалла: SKT = -5,85, $p < 0,001$ (SO_4^*); SKT = +7,15, $p < 0,001$ (ANC)
 Fig. 6. Distribution of SO_4^* and ANC in the water of lakes of the Kola region for the period from 1990 to 2023. Mann – Kendall test: SKT = -5,85, $p < 0,001$ (SO_4^*); SKT = +7,15, $p < 0,001$ (ANC)

означает, что в случае высокой степени уязвимости озер закисление вод по-прежнему для них характерно.

При закислении вод наблюдаются развитие кислотоустойчивых мхов, преобладание ацидофильных видов в фито- и зоопланктоне, а также происходит снижение биоразнообразия за счет уменьшения численности бокоплавов, брюхоногих моллюсков, нимф, поденок и веснянок. Бокоплав, типичный обитатель природных олиготрофных вод арктического бассейна, не обнаруживается в воде уже при $\text{pH} < 6,5$. Поэтому в качестве пороговых значений для реги-

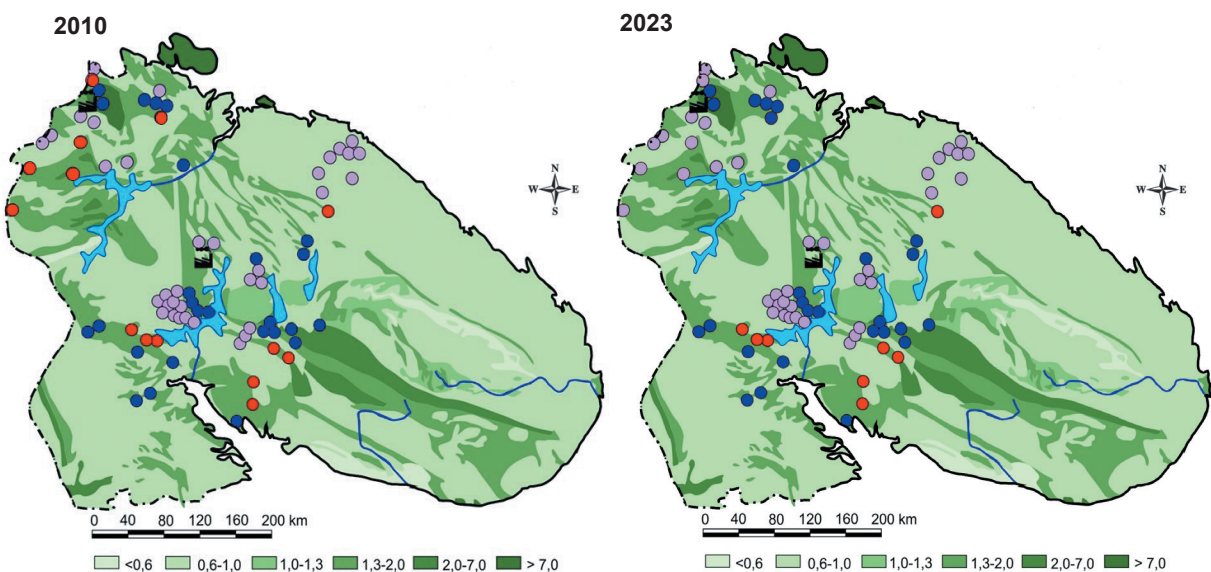
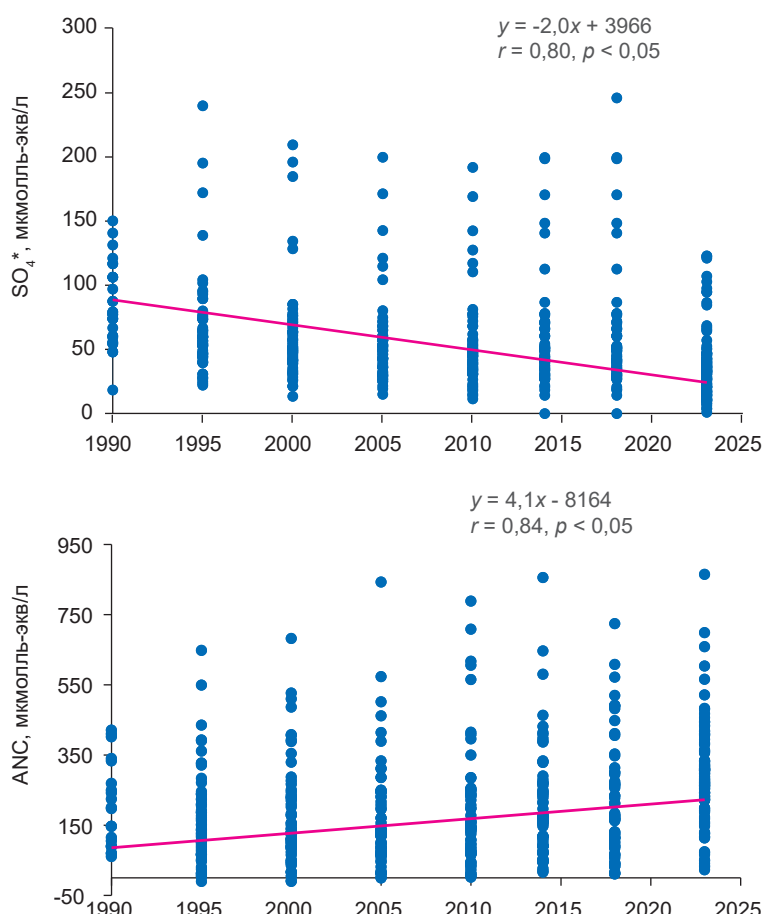


Рис. 7. Динамика восстановления озер после закисления: синий цвет показывает озера с высокой буферной емкостью, сиреневый – восстановленные после закисления озера, красный – по-прежнему закисленные озера. На рисунке отражено распределение горных пород с различной чувствительностью к закислению на территории Кольского Севера по соотношению петрогенных элементов в горных породах K_m , определяющееся как отношение основных оксидов к кремнезему: $K_m = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$

Fig. 7. Lake recovery dynamics after acidification: blue indicates lakes with high buffering capacity, lilac indicates lakes recovered after acidification, and red indicates lakes that are still acidified. The figure shows the distribution of rocks with different sensitivity to acidification in the Kola Peninsula based on the ratio of major elements in rocks K_{rock} , which is defined as the ratio of major oxides to silica: $K_{\text{rock}} = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$

страции процесса в водах региона можно принять снижение $pH < 6,5$, $ANC < 50$ мкмоль-экв/л, а в качестве критических — $pH < 5,5$, $ANC < 20$ мкмоль-экв/л [14].

Эвтрофирование малых озер в условиях потепления климата

Эвтрофирование вод арктического бассейна практически не освещено в современной научной литературе. В отчетах Arctic Monitoring and Assessment Programme [1; 15] эта проблема не обозначена. На многочисленных конференциях, связанных с исследованиями арктического бассейна, вопрос об особенностях эвтрофирования вод высоких широт не выносится на обсуждение даже в связи с потеплением климата. Бесспорно, природные условия формирования вод этого региона, а именно: большой вклад атмосферного питания, высокий промывной режим озер и низкие температуры — замедляют эвтрофирование вод. Отсутствие знаний об особенностях эвтрофирования вод в холодных широтах может привести к недооценке экологических последствий этого явления. Б. Хендерсон-Селлерс и Х. Маркленд [16] отмечали необходимость всестороннего рассмотрения эвтрофирования, подчеркивая, что одностороннее использование одного или нескольких критериев может привести к искажению реально существующей картины. При поступлении хозяйственных стоков эвтрофирование в северных регионах проявляется: а) развитием дефицита кислорода в придонных слоях воды в подледный период длительной полярной зимы; б) «цветением» воды вследствие интенсивного развития фитопланктона в пик весенней (апрель) и летней (конец июля — начало августа) вегетации до значений, соответствующих эвтрофному и гипертрофному уровню — 1—5 тыс. клеток/м³; в) снижением видового разнообразия за счет исчезновения северных требовательных к качеству вод видов; г) увеличением показателя содержания хлорофилла «а», используемого при измерении «откликов» экосистемы на биогенную нагрузку, в 10—12 раз [17].

Для оценки изменений трофического статуса озер был применен интегральный индекс Р. Карлсона (TSI) [18], который рассчитывается с использованием следующих формул:

$$TSI = TSI(S) + 2 \left[\frac{TSI(TP) + TSI(PO_4) + TSI(Chl\text{“}a\text{”})}{7} \right], \quad (2)$$

$$TSI(S) = 10 \left(6 - \frac{0,64 + \ln S}{\ln 2} \right), \quad (3)$$

$$TSI(TP) = 10 \left[6 - \frac{\ln \left(\frac{80,32}{TP} \right)}{\ln 2} \right], \quad (4)$$

$$TSI(PO_4) = 10 \left[6 - \frac{\ln \left(\frac{21,67}{PO_4} \right)}{\ln 2} \right], \quad (5)$$

$$TSI(Chl\text{“}a\text{”}) = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln Chl\text{“}a\text{”}}{\ln 2} \right). \quad (6)$$

Содержание хлорофилла «а» (Chl«a») рассчитано по формуле, характерной для арктических озер Кольского Севера:

$$Chl\text{“}a\text{”} = 0,92 \ln P_{\text{общ}} - 0,45 \quad (r = 0,82; p = 0,05). \quad (7)$$

Прозрачность воды по диску Секки в среднем за вегетационный сезон определялась по формуле

$$Sec = 10^{[1,26 - 0,31 \text{ LOG}_{10}(P) - 0,36 \text{ LOG}_{10}(TP)]}. \quad (8)$$

Критерии трофности согласно индексу Карлсона TSI соответствуют следующим значениям: олиготрофные (0—30), мезотрофные (30—50), эвтрофные (50—70), гипертрофные (70—100).

Согласно индексу Карлсона, количество олиготрофных озер снизилось даже в случаях отсутствия какой-либо антропогенной нагрузки на них. Эти данные согласуются с результатами исследования озер Северной Америки, которые свидетельствуют о глобальных тенденциях обогащения вод биогенными элементами и повышения трофического статуса озер [19].

Для тундровой и лесотундровой зоны Кольского Севера были рассчитаны значения индекса трофического статуса (TSI) за 1995 и 2023 гг. (рис 8). Было отмечено, что в 2023 г. по сравнению с 1995 г. в тундровой зоне количество олиготрофных озер сократилось на 49%, в то же время увеличилось количество мезотрофных — на 27%, эвтрофных — на 22%; в лесотундровой зоне не сохранились олиготрофные озера, увеличилось число мезотрофных озер (на 43%), а число эвтрофных, напротив, сократилось на 34%.

Влияние потепления климата, несомненно, проявится в усилении продукционных процессов в Арктической зоне, которое приведет к более активному поглощению биогенных элементов как на водосборе, так и в трофической структуре водных экосистем.

В работах ряда ученых появилась информация, показывающая феномен повсеместного увеличения в водах суши содержания органического вещества гумусовой природы (DOC) на многих континентах, которое происходило на фоне снижения содержания техногенных сульфатов и увеличения буферной способности вод (ANC). Этот феномен наблюдался в озерах и реках Европы и Северной Америки [20]. Временное увеличение DOC было названо «brownification» и представляет собой окрашивание воды в желто-коричневый цвет, вызванное поступлением растворенного гумусового вещества

из наземных экосистем и водно-болотных угодий, что характерно для озер с высоким содержанием DOC [20; 21]. Наши данные показывают достоверную зависимость содержания в воде DOC, как и общих форм азота и фосфора, от температурных условий:

$$DOC = 1,7T - 12,1$$

$$(r = 0,72, p < 0,01);$$

$$P_{tot} = 3,3T - 29$$

$$(r = 0,79, p < 0,01);$$

$$N_{tot} = 50T - 137$$

$$(r = 0,71, p < 0,01).$$

При оценке состояния водоемов арктического бассейна в условиях биогенной нагрузки необходимо применять всесторонний комплексный подход по ряду критериев, придерживаясь их минимальных границ, а также учитывать «шаг» развития водоема к качественно новому состоянию по отношению к природному: в [22] предложена градация, наиболее приемлемая для арктических вод. Концентрация Chl^a , при которой арктические озера соответствуют мезотрофному статусу, будет составлять 2–6 мг/м³, а эвтрофному статусу — более 6 мг/м³.

Начало неблагоприятного эвтрофирования вод наблюдается при концентрации P_{tot} равной 10 мкг/л, Chl^a — 4 мг/м³; критическое состояние водоема — при $P_{tot} > 90$ мкг/л и соответственно $Chl^a > 50$ мг/м³ [23]. При оценке эвтрофирования арктических вод наиболее ясную картину формируют показатели изменений фитопланктонного сообщества и развитие дефицита кислорода в полярную зиму в придонных горизонтах. Массовое развитие криптофитовых водорослей и в пик цветения — сине-зеленых водорослей, сокращение численности типичных северных видов и снижение биоразнообразия являются индикаторами эвтрофирования вод.

Малые озера в оценке миграционной активности металлов

Металлы распространяются в составе пылевых частиц и дымовых выбросов металлургических производств и теплоэнергетических объектов [24], в конечном счете мигрируют в водные объекты. Мы проанализировали данные по 14 микроэлементам вод озер Кольского региона (за 2018 г.) и сопоставили их с микроэлементным составом вод Фенноскандии (северных регионов Швеции, Норвегии и Финляндии), которые были отобраны в удаленных от промышлен-

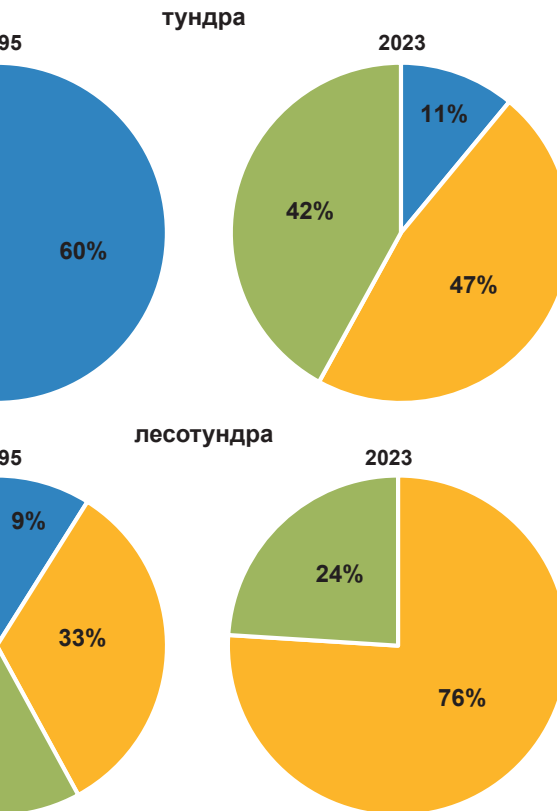


Рис. 8. Трофический статус изученных озер Кольского Севера в тундре (19 озер) и лесотундре (24 озера) за 1995 и 2023 гг.: голубой цвет — олиготрофные озера, желтый — мезотрофные, зеленый — эвтрофные
Fig. 8. Trophic status of the studied lakes of the Kola North in the tundra and forest-tundra (24 lakes) for 1995 and 2023: blue — oligotrophic lakes, yellow — mesotrophic, green — eutrophic

ных производств местах в 1995 г. в рамках проекта «Survey lakes» (табл. 1), поэтому концентрации элементов были приняты за условно-фоновые [25].

Повышенное содержание Cu и Ni в воде озер Кольского Севера по сравнению с условно-фоновыми концентрациями обусловлено выбросами от горно-металлургических комбинатов. Содержания Mn, U, Zn в воде озер Кольского Севера сопоставимы с условно-фоновыми. Повышенные концентрации Mo в водах озер, вероятнее всего, связаны с наличием руд молибдена в Хибинском щелочном массиве и с разработкой апатит-нефелиновых руд. Обогащение вод V связано с пылением АО «Апатит». Высокие значения Cd по сравнению с условно-фоновыми значениями, полученными для тундровой зоны Фенноскандии, могут быть связаны с его выщелачиванием кислотными отложениями.

Мы приводим результаты оценок фактора обогащения вод металлами. Он был рассчитан по методу Cullen, Maldonado [26] (Enrichment factors, EF) как соотношение отдельных элементов к содержанию алюминия, который был выбран в качестве реперного в исследуемом объекте к таковому в земной коре:

Таблица 1. Медиана и вариабельность концентраций микроэлементов (min-max) в воде малых озер Кольского Севера и Фенноскандии, значения представлены в мкг/л

Table 1. Median and variability of microelement concentrations (min-max) in the small lakes water of the Kola North and Fennoscandia, values are presented in µg/l

Металл	Фенноскандия	Кольский Север
Ni	0,24 (< 0,10-3,17)	0,90 (< 0,2-5,5)
V	< 0,3 (< 0,3-2,23)	0,35 (< 0,02-0,76)
Mo	< 0,04 (< 0,04-6,95)	0,14 (0,04-0,32)
Cu	0,33 (< 0,20-3,0)	0,7 (0,2-2,9)
Cd	< 0,02 (< 0,02-0,21)	0,09 (< 0,05-0,21)
As	0,63 (< 0,01-27,3)	0,1 (< 0,1-0,3)
Sb	0,03 (< 0,01-0,358)	0,04 (0,01-0,13)
Mn	2,3 (< 0,1-101)	1,6 (0,2-18,0)
Li	—	0,18 (0,11-0,65)
Zn	1,1 (< 0,3-?)	0,9 (0,2-4,7)
U	0,04 (< 0,004-2,22)	0,03 (0,01-0,30)
Fe	—	50,0 (4,3-600)
Pb	0,14 (< 0,03-7,69)	< 0,1 (< 0,1-0,6)
Sn	—	0,09 (0,04-0,32)

Примечание. Прочерки означают, что значения не были измерены.

Note. Dashes indicate that the values have not been measured.

$$EFC_x = \frac{(C_x:Al)_{water}}{(C_x:Al)_{rock}}$$

Следует отметить важный момент: мы рассчитываем процентное содержание отдельных элементов в минеральном составе вод от общей суммы солей, содержащихся в водах. Данное соотношение использовалось для пород, характерных для Кольского региона, сведения об элементном составе горных пород были взяты по А. П. Виноградову [27], и был рассчитан фактор обогащения вод металлами (рис. 9).

Для малых озер отмечены повышенные содержания по Ni, Cd, As, Sb, Zn, Mo, V, Sn вследствие распространения дымовых выбросов аэрозолей металлов с комбинатов, расположенных на Кольском Севере. Обогащение вод As может быть связано с увеличением его миграционной активности в кислой среде и соответственно поступления в воды [28]. Обогащение вод V связано с разработкой месторождений бокситовых руд, в которых в качестве попутных компонентов присутствует ванадий [5]. Обогащение вод Sn, Pb и Cd связано с месторождениями и рудопроявлениями, характерными для данного региона.

Особо опасная ситуация проявления токсичного воздействия металлов в приарктических озерах возникает: 1) в условиях формирования кислородного дефицита в период длительной полярной зимы; 2) в период половодья, когда накопленные в снежном покрове элементы и вещества в период длительной полярной зимы стремительно поступают с водосбора в короткий период снеготаяния. Нарушения и дисфункции в системах организма лососевых и сиговых рыб являются информативным критерием диагностики токсичного загрязнения вод арктических озёр.

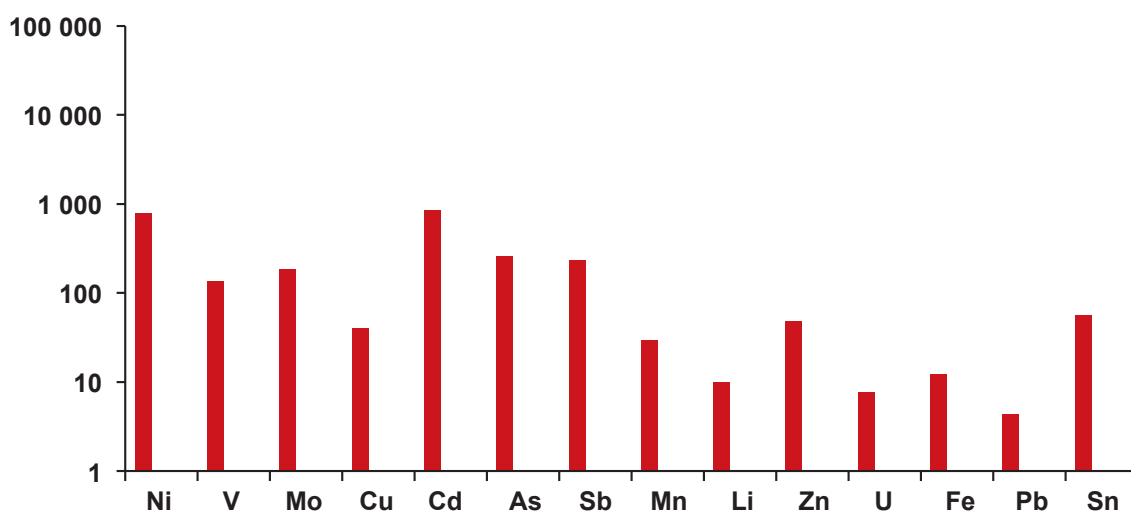


Рис. 9. Коэффициент обогащения вод. Данные представлены в логарифмической шкале для малых озер аэротехногенного влияния

Fig. 9. Water enrichment factor. Data are presented on a logarithmic scale for small lakes with aero-technogenic influence

тического бассейна [16; 18]. Согласно расчетам ученых, фактор обогащения не должен превышать 10 [29]; как видно на рис. 9, в озерах Кольского Севера он значимо выше для большинства металлов.

Выводы

Интенсивное освоение богатых месторождений полезных ископаемых арктического региона и трансграничные переносы загрязняющих веществ приводят к быстрому нарушению хрупкого экологического равновесия уже во многих урбанизированных районах Крайнего Севера. На примере Кольского региона доказано, что в водных системах арктических регионов даже в случаях отсутствия прямого загрязнения развиваются процессы эвтрофирования, закисления и токсичного загрязнения вод.

Система регламентации загрязнений на основе ПДК не учитывает весь комплекс физико-химических и биологических процессов, протекающих в водоемах, специфику и высокую уязвимость природы северных вод. Универсальных критериев для оценки всех неблагоприятных процессов в водах суши не существует; например, для оценки закисления вод наиболее информативную оценку изменения в экосистемах формирует зообентосное сообщество, эвтрофирования — фитопланктонное сообщество, загрязнения металлами — патологии и дисфункции в организме рыб.

Реакция экосистем на токсичное загрязнение имеет более сложный и многоаспектный характер. С учетом всего многообразия и особенностей круговорота опасных элементов и веществ нормативы качества вод для вод арктического бассейна должны быть более жесткими по крайней мере в 3—5 раз и переменными в зависимости от характеристик природного водного объекта и антропогенной нагрузки, а также сопутствующих факторов.

Финансирование

Работа выполнена по теме государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН.

Литература/References

1. Arctic Freshwater System in a Changing Climate. WCRP Climate and Cryosphere (CliC) Project, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), International Arctic Science Committee (IASC) CliC/AMAP/IASC, 2016. Available at: <http://www.amap.no/documents/doc/The-Arctic-Freshwater-System-in-a-Changing-Climate/1375>.
2. Моисеенко Т. И., Денисов Д. Б. Возможно ли восстановление озерной арктической экосистемы после длительного загрязнения? // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 16—25. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-16-25.
3. Moiseenko T. I., Denisov D. B. Is it possible to restore the Arctic lake ecosystems after long-term pollu-

tion? Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 4 (36), pp. 16—25. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-16-25. (In Russian).

3. Moiseenko T. I., Bazova M. M., Gashkina N. A. Development of Lake from Acidification to Eutrophication in the Arctic Region under Reduced Acid Deposition and Climate Warming. *Water*, 2022, 14, p. 3467. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14213467>.

4. Moiseenko T. I., Bazova M. M. Eutrophication of Lakes: From Global Process to Regional Implication in the Kola Arctic Region. *Ecohydrology*, 2024, vol. 8, p. e2713. Available at: <https://doi.org/10.1002/eco.2713>.

5. Ежегодные доклады о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 1990—2023 гг. — URL: <https://mpr.gov-murman.ru/activities/napravleniya/okhrana-okrzhayushchey-sredy/00.condition/>.

Annual reports on the state and protection of the environment of the Murmansk region in 1990—2023. Available at: <https://mpr.gov-murman.ru/activities/napravleniya/okhrana-okrzhayushchey-sredy/00.condition/>. (In Russian).

6. Архив погоды: Мурманская область. Справочно-информационный портал «Погода и климат». — URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=51>.

Arkhiv pogody: Murmanskaya oblast, Spravochno-informatsionnyi portal "Pogoda i klimat" [Weather Archive: Murmansk region, Reference and Information Portal "Weather and Climate"]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=51>. (In Russian).

7. Moiseenko T. I., Kudrjavzeva L. P. Trace Metals Accumulation and Fish pathologies in Areas affected by Mining and Metallurgical enterprises. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 114, no. 2, pp. 285—297. DOI: 10.1016/S0269-7491(00)00197-4.

8. Моисеенко Т. И. Эволюция экосистем в условиях антропогенных нагрузок: через дезорганизацию к самоорганизации // Геохимия. — 2020. — Т. 65, № 10. — С. 939—948. — DOI: 10.31857/S0016752520100118.

Moiseenko T. I. Evolution of ecosystems under an anthropogenic load: from disorganization to self-organization. *Geochemistry Intern.*, 2020, vol. 58, no. 10, pp. 1083—1091. (In Russian).

9. Palmer M. A., Ambrose R. F., Poff N. I. Ecology theory and community restoration ecology. *Restoration Ecology*, 2007, 5, pp. 291—300. DOI: 10.1046/j.1526-100X.1997.00543.x.

10. ICP Waters. Available at: <https://www.icp-waters.no>.

11. Moiseenko T. I., Bazova M. M., Dinu M. I., Gashkina N. A., Kudryavtseva L. P. Changes in the Geochemistry of Land Waters at Climate Warming and a Decrease in Acid Deposition: Recovery of the Lakes or Their Evolution? *Geochemistry Intern.*, 2022, vol. 60, no. 7, pp. 685—701. DOI: 10.1134/S0016702922060039.

12. Henriksen A., Kamari J., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters. *Ambio*, 1992, vol. 21, no. 5, p. 356.
13. Moiseenko T. I., Dinu M. I., Bazova M. M., de Wit H. A. Long-Term Changes in the Water Chemistry of Arctic Lakes as a Response to Reduction of Air Pollution: Case Study in the Kola, Russia. *Water, Air, Soil Pollut.*, 2015, vol. 226, no. 4, p. 98. DOI: 10.1007/s11270-015-2310-0.
14. Brakke D. F., Landers D. H. Chemical and physical characteristics of lakes in the northeastern United States. *Environ. Sci. Technol.*, 1988, vol. 22, no. 2, pp. 155—163.
15. Arctic pollution issues: a state of the arctic environment report. Publication by AMAP. Oslo, Norway, 1997, 188 p.
16. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 277 с. Henderson-Sellers B., Markland H. R. Decaying Lakes. The Origins and Control of Cultural Eutrophication. UK, Chichester, Wiley, 1987, 254 p. DOI: 10.2134/jeq1989.00472425001800010030x.
17. Моисеенко Т. И., Лукин А. А., Кудрявцева Л. П. и др. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. — М.: Наука, 2002. — 476 с. Moiseenko T. I., Lukin A. A., Kudryavtseva L. P. et al. Anthropogenic Modifications of the Lake Imandra Ecosystem. Moscow, Nauka, 2002, 476 p. (In Russian).
18. Carlson R. E. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and oceanography*, 1977, vol. 22, no. 1, p. 361.
19. Stoddard J. L., Van Sickle J., Herlihy A. T., Brahney J., Paulsen S., Peck D. V., Mitchell R., Pollard A. I. Continental-scale increase in lake and stream phosphorus: Are oligotrophic systems disappearing in the United States? *Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 50, pp. 3409—3415. DOI: 10.1021/acs.est.5b05950.
20. Monteith D. T., Stoddard J. L., Evans C. D., de Wit H. A., Forsius M., Hogasen T., Wilander A., Skjelkvale B. L., Jeffries D. S., Vuorenmaa J., Keller B., Kopacek J., Vesely J. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*, 2007, vol. 450, pp. 537—540. DOI: 10.1038/nature06316.
21. De Wit H. A., Valinia S., Weyhenmeyer G. A., Futter M. N., Kortelainen P., Austnes K., Hessen D. O., Råike A., Laudon H., Vuorenmaa J. Current Browning of Surface Waters Will Be Further Promoted by Wetter Climate. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 2016, vol. 3, p. 430. DOI: 10.1021/acs.estlett.6b00396.
22. Rast W., Lee G. Relationship between Summer Mean and Maximum Chlorophyll a Concentrations in Lakes. *Environ. Sci. Technol.*, 1979, vol. 13, p. 869.
23. Moiseenko T. I., Sandimirov S. S., Kudryavtseva L. P. Eutrophication of Surface Water in the Arctic Region. *Water Resources.*, 2001, vol. 28, no. 3, pp. 307—316. DOI: 10.1023/A:1010404908568.
24. Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Dinu M. I., Kremleva T. A., Khoroshavin V. Yu. Water Chemistry of Arctic Lakes under Airborne Contamination of Watersheds. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, p. 1659. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12061659>.
25. Skjelkvale B. L., Stoddard J., Andersen T. Trends in surface water acidification in Europe and North America (1989—1998). *Water, Air and Soil Pollut.*, 2001, vol. 130, pp. 787—792.
26. Cullen J. T., Maldonado M. T. Biogeochemistry of Cadmium and Its Release to the Environment. Cadmium: From Toxicity to Essentiality. [S. l.], Springer, 2013, pp. 31—62.
27. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. — 1962. — Т. 7. — С. 565—571. Vinogradov A. P. Average chemical elements in the main types of erupted rocks of the Earth's crust. *Geochemistry Intern.*, 1962, vol. 7, pp. 565—571. (In Russian).
28. Smedley P. L., Kinniburgh D. G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.*, 2002, vol. 17, pp. 517—568.
29. Reimann C., de Caritat P. Intrinsic flaws of element enrichment factors (EF's) in environmental geochemistry. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, vol. 34, pp. 5084—5091.

Информация об авторах

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

Базова Мария Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19).

LAKES OF THE KOLA NORTH IN THE CONTEXT OF DECLINING MAN-MADE RELEASES AND GLOBAL WARMING

Moiseenko, T. I., Bazova, M. M.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on October 15, 2025

For citing

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. (In Russian).

Abstract

The authors present the results of the lake biogeochemistry studies in the context of reduced releases from copper-nickel production and observed climate warming in the Kola Peninsula of Russia. They show the main changes in the lake hydrochemistry over the past 25 years (1998 to 2023). The development of man-made induced processes, such as eutrophication, acidification, and toxic metal pollution, is characterized under a changing climate. It is shown that aquatic systems evolve into a new state, distinct from natural indicators, as pollution decreases and climate warming influences. The authors substantiate criteria for diagnosing adverse processes in the waters of the Far North.

Keywords: *Arctic basin, land waters, eutrophication, acidification, toxic pollution, assessment criteria.*

Funding

This work was carried out within the framework of a state assignment from the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Science.

Information about the authors

Moiseenko, Tatiana Ivanovna, Doctor of Biological Science, Corresponding member of RAS, Head of the Department of Biogeochemistry and Geoecology, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences (19, Kosygin St., Moscow, Russia, 119991), e-mail: moiseenko@geokhi.ru.

Bazova, Maria Mikhailovna, PhD of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Evolutionary Biogeochemistry and Geoecology, Vernadsky Institute Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences (19, Kosygin St., Moscow, Russia, 119991).

© Moiseenko T. I., Bazova M. M., 2026