

УДК 504.455 : 57.04

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОЗЕРНЫХ ВОД УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ В АРКТИКЕ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР ГОРОДА МУРМАНСКА)

М. А. Постевая^{1,2*}, В. А. Даувальтер¹, З. И. Слуковский¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (Академгородок, 14а, Апатиты, Россия, 184209), *Postevaya.ma@yandex.ru

² Мурманский арктический университет (ул. Капитана Егорова, 15, Мурманск, Россия, 183038)

Представлены результаты анализа закономерностей формирования химического состава озерных вод в условиях городской среды. Объектами исследования послужили восемь озер г. Мурманска, в различной степени подверженных антропогенному воздействию. Установлено, что химический состав вод исследованных озер определяется комплексным воздействием природных и антропогенных факторов. На основе результатов факторного анализа методом главных компонент установлено четыре значимых фактора: 1) региональные особенности района исследования (геологическое строение водосборных территорий, влияние морских аэрозолей); 2) поступление аллохтонного органического вещества из почвенного покрова; 3) процесс эвтрофикации озер, а также окислительно-восстановительные условия внутри водоемов; 4) антропогенная нагрузка на водоемы и их водосборы (сжигание мазутного топлива, деятельность автомобильного транспорта, разрушение инфраструктуры). При проведении корреляционного анализа выявлены закономерные зависимости величин pH, минерализации, кислотонейтрализующей способности вод от содержания главных ионов, а также щелочных и щелочноземельных металлов в исследованных озерах. Установлена связь между косвенными показателями содержания органического вещества (ТОС, цветность, гумусность) и концентрациями типоморфных (Fe, Al) и редкоземельных элементов (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd).

Ключевые слова: малые озера; гидрохимия; факторный анализ; корреляционный анализ; урбанизация; Арктика

Для цитирования: Постевая М. А., Даувальтер В. А., Слуковский З. И. Закономерности формирования химического состава озерных вод урбанизированной среды в Арктике (на примере озер города Мурманска) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 33–50. doi: 10.17076/lim1936

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ИППЭС КНЦ РАН № FMEZ-2024-0014.

M. A. Postevaya^{1,2*}, V. A. Dauvalter¹, Z. I. Slukovskii¹. FORMATION PATTERNS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE WATER IN AN URBANIZED ENVIRONMENT IN THE ARCTIC (MURMANSK LAKES CASE STUDY)

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Russia), *Postevaya.ma@yandex.ru

² Murmansk Arctic University (15 Kapitan Egorov St., 183038 Murmansk, Russia)

The paper presents the results of an analysis of the formation patterns of the chemical composition of lake water in an urban environment. The objects of the study were eight lakes of Murmansk, which are exposed to human impact of varying degree. It established that the chemical composition of water in the studied lakes is shaped by a combination of natural and anthropogenic factors. Factor analysis by the principal components method revealed four significant factors: 1) regional features of the study area (geological structure of catchment areas, influence of marine aerosols); 2) inflow of allochthonous organic matter from the land cover; 3) eutrophication of lakes, as well as redox conditions inside the lakes; 4) human pressure on the lakes and their catchments (combustion of fuel oil, motor transport, degradation of infrastructure). Correlation analysis showed that the water pH, total dissolved solids, and acid neutralizing capacity depended in a regular manner on the content of major ions and alkaline and alkaline-earth metals in the studied lakes. A relationship was detected between indirect indicators of organic matter content (TOC, chromaticity, humus) and concentrations of typomorphic (Fe, Al) and rare-earth elements (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd).

Keywords: small lakes; hydrochemistry; factor analysis; correlation analysis; urbanization; Arctic

For citation: Postevaya M. A., Dauvalter V. A., Slukovskii Z. I. Formation patterns of the chemical composition of lake water in an urbanized environment in the Arctic (Murmansk lakes case study). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 33–50. doi: 10.17076/lim1936

Funding. The research was carried out within state assignment No. FMEZ-2024-0014 to the Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences.

Введение

Формирование химического состава озерных вод обуславливается совокупностью физических, химических и биологических процессов, протекающих в водоеме и на его водосборе [Osadchyy et al., 2016]. Состав природных вод формируется под влиянием таких физико-географических условий, как рельеф, климат, процессы выветривания горных пород, состав и структура почвенного покрова и др. Помимо этого, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия внутри водоема определяют растворимость минералов и скорость миграции элементов, а также форму их нахождения в природных водах [Даувальтер, Кашулин, 2014; Osadchyy et al., 2016]. При определенных условиях среды донные отложения могут как выступать источником вторичного поступления биогенных элементов и тяжелых металлов в водную среду, так и снижать их токсическое воздействие посредством образования устойчивых комплексных соединений с гумусовыми кислотами, входящими в состав донных отложений [Algül, Beyhan, 2020].

Урбанизированные ландшафты обуславливают специфические особенности формирования озерных вод, в значительной степени отличающиеся от естественных условий. Данные территории испытывают высокое антропогенное и техногенное воздействие со стороны транспорта, промышленных предприятий, жилищно-коммунального хозяйства и т. д. [Саэт и др., 1990]. При этом городские застройки, асфальтированные и другие водонепроницаемые покрытия способствуют «запечатыванию» почвенного покрова. В таких экранированных («запечатанных») почвах происходит нарушение водного и теплового баланса, снижение биологической продуктивности, а также способности к самоочищению почв [Кошелева, 2019]. Как следствие, увеличивается доля поверхностного стока с повышенным уровнем загрязняющих веществ в водные объекты [Черногаева и др., 2019]. В дальнейшем это может привести к трансформации природных вод, а именно к эвтрофикации, антропогенному закислению или защелачиванию и обогащению токсичными микроэлементами водных экосистем [Никаноров, 2001].

Характерной особенностью северных широт является избыточное увлажнение территорий, низкие температуры, маломощный почвенный покров и, как следствие, замедленные процессы химического выветривания элементов, а также минерализации органического вещества. В результате в условиях Арктики формируются ультрапресные и олиготрофные воды, чутко реагирующие на все изменения, происходящие на их водосборах [Moiseenko, 2018]. Гумидный тип климата обуславливает низкое содержание основных катионов в почвенном покрове и вместе с тем особую чувствительность пресноводных экосистем к кислотному воздействию [Моисеенко и др., 2015]. Смещение pH природных вод в сторону кислых значений способствует увеличению растворимости, миграционной способности и токсичности тяжелых металлов, содержащихся в воде [Skjelkvåle et al., 2007; Yevtushenko et al., 2021]. Биота северных регионов характеризуется низким видовым разнообразием, уязвимость ее от кислотного и токсического воздействия возрастает после полярной ночи [Skjelkvåle et al., 2007]. Как уже отмечалось, для северных широт характерен олиготрофный тип озер. Однако увеличение содержания питательных веществ, вызванное глобальным потеплением климата

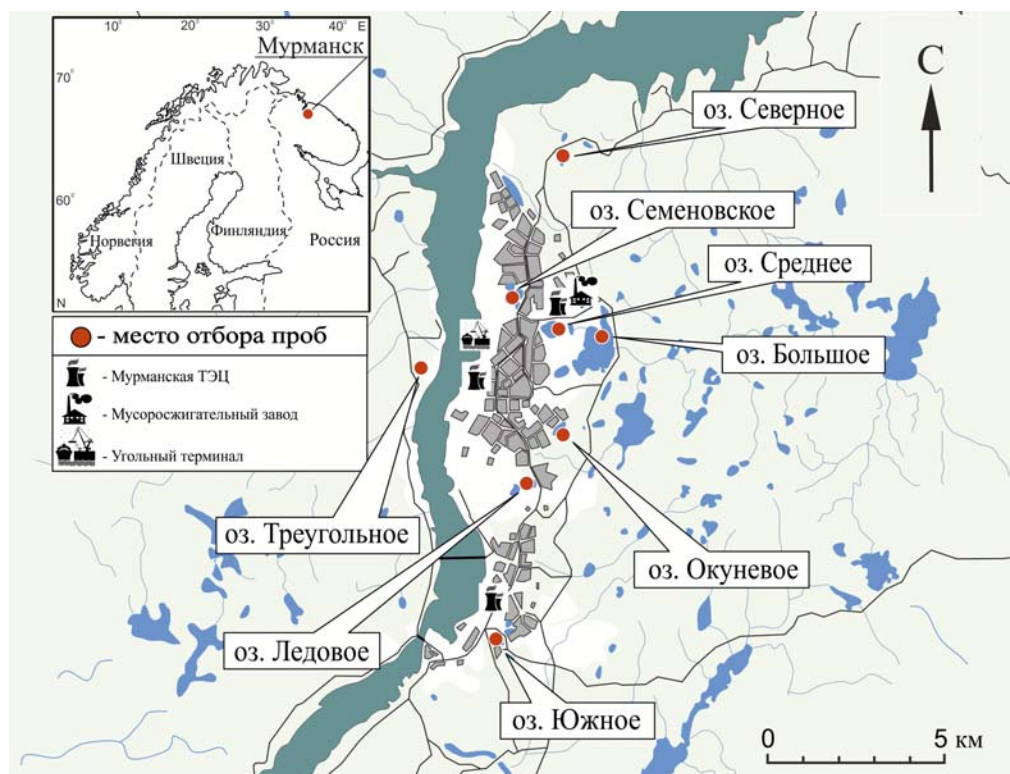
или антропогенной деятельностью, способствует цветению воды и гибели рыб даже в арктических регионах [Ayala-Borda et al., 2021; Kashulin et al., 2021; Moiseenko et al., 2022].

Таким образом, проблема определения закономерностей формирования поверхностных вод, в особенности в условиях городской среды арктических регионов, на сегодня остается актуальной. В настоящее время при изучении влияния природных и антропогенных факторов на химический состав озерных вод широкое применение получили методы математической статистики, в том числе и факторный анализ [Gradilla-Hernández et al., 2020; Khan et al., 2022; Li et al., 2023].

Цель работы – выявление основных факторов, определяющих химический состав озерных вод г. Мурманска, а также установление взаимосвязей в содержании макро- и микроэлементов при помощи методов статистического анализа.

Материалы и методы

Объектами исследования послужили восемь озер г. Мурманска, в различной степени подверженные антропогенному воздействию [Слуковский и др., 2023] (рис.).



Карта-схема расположения объектов исследования
Schematic map of the studied objects

Морфометрические показатели

Озеро Большое обладает наибольшими значениями площади водного зеркала и водосборного бассейна из всех исследуемых озер (табл. 1). Наименьшим по площади, глубине и размерам водосборного бассейна является оз. Северное. Самое глубоководное – оз. Среднее; на втором месте по данному показателю стоит оз. Ледовое с максимальной глубиной 15,7 м. Коэффициент открытости варьировал в пределах от 0,005 до 0,088, что характеризует котловины всех исследуемых озер как слабо открытые, с низкой степенью ветрового перемешивания водных масс [Лопух, Якушко, 2011]. Большинство озер имеют параболическую форму котловины. Исключение составляют озера Семеновское и Южное, для которых характерна коническая форма, а также оз. Треугольное с полуэллипсоидной котловиной.

Основные морфологические показатели, такие как площадь водного зеркала, площадь водосборного бассейна, длина озера, длина береговой линии, максимальная и средняя глубина, а также объем водной массы исследуемых озер, были взяты из монографии [Слуковский и др., 2023]. Батиметрические исследования проводились при помощи эхолота-картплотте-

ра Garmin Echomap Plus 42св. В свою очередь, параметры, характеризующие подводную (коэффициенты емкости, открытости, глубинности) и надводную (коэффициенты удлиненности, изрезанности) форму котловин, а также значения средней ширины озера и показатель удельного водосбора определялись расчетным методом в соответствии с работами С. В. Григорьева, П. С. Лопуха и О. Ф. Якушко. Средняя ширина озера (B_{cp}) определена как частное от деления площади водного зеркала на длину озера: $B_{cp} = \frac{F}{L}$. Коэффициент изрезанности береговой линии (M) определен как отношение длины береговой линии (l) к длине окружности круга, площадь которого равна площади исследуемого водоема: $M = \frac{l}{2\sqrt{F\pi}}$. Коэффициент удлиненности озера ($K_{уд}$) определен как отношение длины озера (L) к средней ширине (B_{cp}): $K_{уд} = \frac{L}{B_{cp}}$. Коэффициент глубинности ($K_{гн}$) определен как отношение средней глубины озера ($H_{сред}$) к его площади водного зеркала (F) по следующей формуле: $K_{гн} = \frac{H_{сред}}{\sqrt[3]{F}}$. Коэффициент открытости ($K_{откр}$) определен как отношение площади озера (F) к средней глубине котловины ($H_{сред}$): $K_{откр} = \frac{F}{H_{сред}}$. Коэффициент емкости озерной котловины (C) установлен как отношение средней глубины озера ($H_{сред}$) к максимальной глубине ($H_{макс}$): $C = \frac{H_{сред}}{H_{макс}}$. Показатель

Таблица 1. Морфометрические характеристики исследованных озер г. Мурманска

Table 1. Morphometric description of the studied lakes in Murmansk

Озеро Lake	Морфометрические параметры Morphometric parameters								Коэффициенты Coefficients					
	$F^*, \text{км}^2$ km^2	$F_{бас}^*, \text{км}^2$ km^2	$L^*, \text{км}$ km	$B_{cp}^*, \text{км}$ km	$l^*, \text{км}$ km	$H_{макс}^*, \text{м}$ m	$H_{сред}^*, \text{м}$ m	$V^*, \text{км}^3$ km^3	M	$K_{уд}$	$K_{гн}$	$K_{откр}$	C	ΔF
Северное Severnoye	0,009	0,117	0,23	0,04	0,52	3,90	1,75	0,00016	1,55	5,75	8,41	0,005	0,45	13,00
Семеновское Semyonovskoye	0,213	1,303	0,75	0,28	3,2	11,30	2,40	0,00051	1,96	2,68	4,02	0,088	0,21	6,15
Среднее Srednee	0,248	1,014	0,70	0,35	1,99	23,50	7,70	0,00191	1,20	2	12,3	0,032	0,33	4,09
Большое Bolshoye	1,320	19,170	2,5	0,53	-	-	-	-	-	4,75	-	-	-	14,52
Окуневое Okunevoye	0,048	2,010	0,55	0,09	1,27	5,60	2,30	0,00011	1,63	6,1	6,33	0,021	0,41	41,87
Ледовое Ledovoye	0,040	3,456	0,27	0,15	0,78	15,70	7,80	0,00031	1,10	1,8	22,8	0,005	0,50	86,40
Треугольное Treugolnoye	0,100	0,397	0,16	0,62	0,55	8,60	5,60	0,00056	0,49	0,26	12,1	0,018	0,65	3,97
Южное Yuzhnoye	0,053	0,808	0,43	0,12	1,13	11,30	3,05	0,00016	1,38	3,58	8,12	0,017	0,27	15,24

Примечание. F – площадь озера; $F_{бас}$ – площадь водосборного бассейна; L – длина озера; B_{cp} – средняя ширина озера; l – длина береговой линии; $H_{макс}$ – максимальная глубина; $H_{сред}$ – средняя глубина; V – объем водной массы; M – коэффициент изрезанности береговой линии; $K_{уд}$ – коэффициент удлиненности; $K_{гн}$ – коэффициент глубинности; $K_{откр}$ – коэффициент открытости; C – коэффициент емкости; ΔF – показатель удельного водосбора; * данные по: Слуковский и др., 2023.

Note. F – lake area; $F_{бас}$ – catchment area; L – lake length; B_{cp} – average lake width; l – coastline length; $H_{макс}$ – maximum depth; $H_{сред}$ – average depth; V – water mass volume; M – coefficient of coastline irregularity; $K_{уд}$ – elongation coefficient; $K_{гн}$ – depth coefficient; $K_{откр}$ – exposure coefficient; C – capacity coefficient; ΔF – coefficient of specific catchment; * data after: Slukovskii et al., 2023.

удельного водосбора (ΔF) определен как отношение площади озера (F) к площади водосборного бассейна ($F_{\text{бас}}$): $\Delta F = \frac{F}{F_{\text{бас}}}$ [Григорьев, 1959; Лопух, Якушко, 2011].

Отбор и анализ проб

Отбор проб воды осуществлялся в период с 2018 по 2022 г. при помощи батометра из поверхностного (1 м от поверхности) и придонного (1 м от дна) горизонтов. Отобранная вода переливалась в полиэтиленовые бутылки, которые дважды ополаскивали озерной водой. Пробы воды помещали в темные контейнеры и в короткие сроки транспортировали в лабораторию при температуре +5 °С.

Аналитические исследования проводили в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН по единым стандартным методикам [Clesceri et al., 1999; Моисеенко и др., 2002]. Показатель pH определялся методом потенциометрии на pH-метре фирмы Metrohm. Определение концентраций Na^+ , K^+ (модель Perkin-Elmer 460, воздушно-ацетиленовое пламя) и Ca^{2+} , Mg^{2+} (модель Perkin-Elmer 460, закись азота-ацетиленовое пламя) осуществлялось методом пламенной атомно-эмиссионной спектроскопии. Концентрации SO_4^{2-} и Cl^- определялись на жидкостном хроматографе Millipore, модель Waters 430. Концентрации гидрокарбонатов определялись методом титрования Грана. Также определялось содержание органического материала методом окисления Mn, концентраций форм Si, N и P, а также показатель цветности озерных вод (колориметрическим методом).

Общий органический углерод (TOC) оценивался по перманганатной окисляемости (COD_{Mn}): $\text{TOC} = 0,764 \cdot \text{COD}_{\text{Mn}} + 1,55$ [Henriksen, 1992]. Расчетное значение гумусности воды (Hum) определялось как среднее геометрическое значение показателей Color и COD_{Mn} : $\text{Hum} = \sqrt{\text{Color} \times \text{COD}_{\text{Mn}}}$ [Лозовик, 2006]. Содержание органического аниона ($A_{\text{орг}}^-$) рассчитывалось на основе содержания органического вещества: $A_{\text{орг}}^- = \text{TOC} \cdot (4,7 - 6,87 \cdot \exp(-0,332 \cdot \text{TOC}))$ [Oliver et al., 1983]. Кислотонейтрализующая способность вод (ANC) исследуемых озер (мкг-экв/л) рассчитывалась без поправки на морские аэрозоли по следующей формуле: $\text{ANC} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{NH}_4^+] - [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{NO}_3^-] - [\text{Cl}^-]$ [Skjelkvåle et al., 2006]. Содержание микроэлементов (Al, Fe, Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Mo, Ba, La, Pr, Nd, Sm, Gd, U, Mn) в пробах воды измеряли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой ЭЛАН 9000.

Статистическая обработка данных

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программ Microsoft Excel 2019 и Statistica 10. Для выявления связи между концентрациями макро- и микроэлементов и факторов, определяющих химический состав вод исследованных озер, был проведен корреляционный (коэффициент корреляции Пирсона) и факторный (метод главных компонент) анализ. Поскольку распределение концентраций гидрохимических показателей отличалось от нормального, с целью выполнения статистических требований используемых методов к исходным данным было применено Бокс-Кокс преобразование [Box, Cox, 1964; Поронов, 2011]. Для статистического анализа использованы данные по содержанию макро- и микроэлементов в составе озерных вод, а также таких показателей, как pH, минерализация (TDS), цветность, гумусность, кислотонейтрализующая способность вод (ANC) и др. Для проведения факторного анализа дополнительно использованы некоторые морфометрические параметры озер: площадь водного зеркала, площадь водосборного бассейна, показатель удельного водосбора (ΔF), коэффициенты глубинности ($K_{\text{г}}$) и открытости ($K_{\text{откр}}$). При выполнении факторного анализа количество главных компонент определялось при помощи критериев Кайзера (критерий собственных чисел) и Кеттелла (критерий «каменистой осыпи») [Ким, 1989]. Результаты исследования визуализировали в Inkscape 0.48.4 (Free Software Foundation, США) и Corel Draw Graphics Suite 2019 (Corel Corporation, Канада).

Результаты и обсуждение

Химический состав вод озер г. Мурманска

В соответствии с [Никаноров, 2001], за период с 2018 по 2022 г. воды в исследованных озерах по медианным значениям pH относятся к слабокислым (оз. Треугольное), нейтральным (озера Северное, Окуновое, Семеновское, Среднее, Ледовое) и слабощелочным (оз. Южное). Воды оз. Большое по значению pH находятся в пограничном положении между слабокислыми и нейтральными. По степени минерализации (TDS) исследуемые озера подразделяются на маломинерализованные (Окуновое, Семеновское, Среднее, Большое и Треугольное) с общей минерализацией в диапазоне от 19,4 до 140,7 мг/л, среднеминерализованные (Южное, Северное) с минерализацией от 377,4 до 381,0 мг/л,

а в оз. Ледовое выявлена повышенная минерализация – 584 мг/л (табл. 2).

Мурманск расположен на берегу Кольского залива Баренцева моря, что в значительной степени определяет формирование катионно-анионного состава исследуемых озер. Согласно классификации Алекина [1970] воды озер Северное, Семеновское, Большое и Ледовое относятся к хлоридному классу и натриевой

группе, Окуновое – к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе (типичное распределение главных ионов для озер Мурманской области), Треугольное и Южное – к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу и натриевой группе, а Среднее – к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу и кальциевой группе.

Превышение концентраций общего азота и фосфора над условно-фоновыми значениями

Таблица 2. Химический состав вод исследованных озер за период с 2018 по 2022 г. (в числителе представлены медианные концентрации, в знаменателе – минимальные и максимальные)

Table 2. Chemical composition of water in the studied lakes from 2018 to 2022 (the median concentrations are given in the numerator, and the minimum and maximum values – in the denominator)

Показатели Indicator	Северное Severnoye	Семеновское Semyonovskoye	Среднее Srednee	Большое Bolshoye	Окуновое Okunevoye	Ледовое Ledovoye	Треугольное Treugolnoye	Южное Yuzhnoye	Bazova, 2017
pH	$\frac{6,95}{6,37-7,04}$	$\frac{6,66}{6,32-7,05}$	$\frac{7,26}{6,84-7,52}$	$\frac{6,48}{6,45-6,49}$	$\frac{6,93}{6,60-6,99}$	$\frac{7,3}{6,97-9,34}$	$\frac{6,19}{6,09-6,5}$	$\frac{8,02}{7,78-9,11}$	$\frac{6,15}{5,66-6,41}$
Ca ²⁺ , мг/л mg/l	$\frac{27,3}{20,3-32,3}$	$\frac{7,6}{3,1-10,1}$	$\frac{17,7}{16,3-19,6}$	$\frac{3,2}{3,0-3,2}$	$\frac{8,6}{8,3-10,9}$	$\frac{58,6}{36,6-77,4}$	$\frac{2,0}{1,8-2,4}$	$\frac{41,3}{9,2-43,3}$	$\frac{1,1}{0,4-2,1}$
Mg ²⁺ , мг/л mg/l	$\frac{6,7}{4,9-8,0}$	$\frac{2,0}{0,7-2,3}$	$\frac{3,8}{3,6-4,1}$	$\frac{1,2}{1,2-1,2}$	$\frac{2,1}{1,9-2,5}$	$\frac{10}{7,6-13,3}$	$\frac{0,9}{0,7-1,0}$	$\frac{10,0}{5,8-10,9}$	$\frac{0,7}{0,4-0,9}$
Na ⁺ , мг/л mg/l	$\frac{99,4}{74,1-111}$	$\frac{11,1}{4,5-12,6}$	$\frac{17,6}{17,0-18,9}$	$\frac{9,8}{9,8-9,9}$	$\frac{6,1}{5,3-7,4}$	$\frac{112}{97,1-134}$	$\frac{3,2}{3,0-3,2}$	$\frac{56,7}{27,4-61,4}$	$\frac{3,1}{0,8-4,5}$
K ⁺ , мг/л mg/l	$\frac{4,1}{3,3-4,6}$	$\frac{1,9}{0,8-2,9}$	$\frac{3,7}{3,6-4,1}$	$\frac{0,7}{0,7-0,8}$	$\frac{1,3}{1,3-1,6}$	$\frac{9,3}{7,2-11,3}$	$\frac{0,6}{0,6-0,7}$	$\frac{7,8}{4,5-8,9}$	$\frac{0,4}{0,2-0,5}$
HCO ₃ ⁻ , мг/л mg/l	$\frac{26,2}{22,3-39,0}$	$\frac{19,0}{5,9-33,9}$	$\frac{41,9}{39,2-44,6}$	$\frac{4,2}{4,1-4,3}$	$\frac{19,8}{18,1-22,9}$	$\frac{191}{90-313}$	$\frac{6,0}{4,2-8,7}$	$\frac{153}{43,4-163}$	$\frac{3,5}{0,7-757}$
SO ₄ ²⁻ , мг/л mg/l	$\frac{26,4}{4,1-37,2}$	$\frac{10,5}{5,0-13,1}$	$\frac{30,6}{29,2-33,5}$	$\frac{6,58}{6,40-6,80}$	$\frac{14,2}{13,5-17,0}$	$\frac{35,2}{5,4-55,7}$	$\frac{3,3}{3,1-4,1}$	$\frac{21,3}{11,0-43,9}$	$\frac{1,8}{1-3,6}$
Cl ⁻ , мг/л mg/l	$\frac{185,7}{24,4-211}$	$\frac{19,1}{7,5-23,5}$	$\frac{25,9}{23,5-28,1}$	$\frac{16,4}{16,3-17,30}$	$\frac{8,4}{8,1-9,8}$	$\frac{176,5}{160-211}$	$\frac{3,9}{3,1-4,3}$	$\frac{85,9}{39,1-104}$	$\frac{4,8}{1-7,7}$
TDS, мг/л mg/l	$\frac{381}{275,5-426}$	$\frac{70,8}{27,5-84,7}$	$\frac{140,7}{134-150}$	$\frac{42,3}{42,1-43,0}$	$\frac{60,6}{59,0-72,1}$	$\frac{584}{495-735}$	$\frac{19,4}{18,7-23,5}$	$\frac{377,4}{140-432}$	$\frac{28,0}{13-137}$
TN, мкгN/л µgN/l	$\frac{374}{225-695}$	$\frac{501,5}{40-942}$	$\frac{301}{190-415}$	$\frac{150}{142-169}$	$\frac{289}{220-437}$	$\frac{3550}{964-6640}$	$\frac{295}{204-478}$	$\frac{277}{237-325}$	$\frac{160}{99-366}$
TP _{н/ф} , мкгP/л µgP/l	$\frac{14,0}{9,0-153}$	$\frac{25,5}{12-122}$	$\frac{11,0}{6-16}$	$\frac{8}{6-10}$	$\frac{15}{12-17}$	$\frac{451}{17-1677}$	$\frac{16,5}{11,0-45}$	$\frac{19,0}{10,0-24}$	$\frac{6,0}{4,0-21}$
Al, мкг/л µg/l	$\frac{39,75}{19,54-99,0}$	$\frac{12,85}{7,60-29,0}$	$\frac{19,50}{9,85-41,30}$	$\frac{44,90}{44,50-70,10}$	$\frac{76,0}{54,09-110}$	$\frac{35,7}{19,4-285}$	$\frac{85,78}{68,49-123}$	$\frac{9,60}{2,60-39,60}$	30,56
Fe, мкг/л µg/l	$\frac{182}{95-1921}$	$\frac{159}{28-3339}$	$\frac{37,27}{18,00-41,90}$	$\frac{84,00}{84,00-115}$	$\frac{436}{287,3-525}$	$\frac{1490}{88-6051}$	$\frac{1105}{560-3488}$	$\frac{54,4}{32,00-103}$	47,26
V, мкг/л µg/l	$\frac{2,93}{2,14-19,37}$	$\frac{2,84}{0,92-43,11}$	$\frac{3,07}{1,49-26,94}$	$\frac{3,32}{3,25-4,55}$	$\frac{3,55}{2,93-11,12}$	$\frac{5,70}{1,39-12,91}$	$\frac{2,02}{1,50-4,09}$	$\frac{1,26}{0,75-2,23}$	0,67
Ni, мкг/л µg/l	$\frac{5,57}{3,20-13,18}$	$\frac{4,67}{2,84-10,92}$	$\frac{4,99}{4,54-12,2}$	$\frac{6,93}{5,49-7,01}$	$\frac{5,68}{4,89-7,78}$	$\frac{12,33}{7,19-18,66}$	$\frac{2,48}{1,99-12,03}$	$\frac{3,29}{2,07-8,18}$	1,06
Zn, мкг/л µg/l	$\frac{11,61}{3,51-26,56}$	$\frac{5,28}{0,89-19,00}$	$\frac{2,77}{0,75-15,77}$	$\frac{7,96}{7,83-8,82}$	$\frac{9,70}{6,56-30,12}$	$\frac{8,28}{3,75-17,13}$	$\frac{5,63}{3,38-7,68}$	$\frac{1,81}{1,44-3,22}$	1,66
Rb, мкг/л µg/l	$\frac{6,11}{4,52-6,77}$	$\frac{2,94}{1,11-3,62}$	$\frac{5,13}{4,53-6,94}$	$\frac{1,45}{1,43-1,56}$	$\frac{2,48}{2,22-3,33}$	$\frac{9,21}{7,08-11,44}$	$\frac{1,73}{1,59-1,95}$	$\frac{5,36}{4,54-5,79}$	1,07
Sr, мкг/л µg/l	$\frac{188,9}{107,3-250,3}$	$\frac{68,4}{26,40-80,26}$	$\frac{114,5}{95,6-135,2}$	$\frac{27,67}{26,95-27,78}$	$\frac{68,91}{60,79-81,46}$	$\frac{349}{221-554}$	$\frac{21,19}{19,67-24,75}$	$\frac{226}{177-288}$	7,56
Ba, мкг/л µg/l	$\frac{65,55}{41,55-100,1}$	$\frac{22,03}{15,33-33,96}$	$\frac{19,83}{15,55-24,09}$	$\frac{8,06}{7,92-8,29}$	$\frac{21,14}{18,84-26,50}$	$\frac{75,52}{53,26-118}$	$\frac{10,96}{7,89-13,46}$	$\frac{71,54}{56,95-79,24}$	5,08
Mn, мкг/л µg/l	$\frac{18,88}{5,88-176}$	$\frac{28,64}{1,72-398}$	$\frac{7,51}{1,75-109}$	$\frac{6,64}{5,90-9,70}$	$\frac{8,15}{5,54-16,73}$	$\frac{344,4}{5,85-608,9}$	$\frac{27,25}{10,89-417,6}$	$\frac{10,46}{2,32-73,53}$	2,09

зафиксировано во всех озерах г. Мурманска, за исключением оз. Большое, для которого характерны наименьшие значения биогенных элементов (TN 150 мкгN/л; TP 8 мкгP/л). Максимальные концентрации общего фосфора (451 мкгP/л) и азота (3550 мкгN/л) характерны для вод оз. Ледовое. Содержание органического вещества в исследованных озерах, как правило, меньше, чем средние показатели условно-фоновых озер северо-восточной части Мурманской области. Согласно классификации вод по гумусности, оз. Среднее является ультраолигогумусным, озера Южное и Семеновское относятся к олигогумусным, а озера Ледовое, Окуновое, Северное, Большое и Треугольное – к мезогумусным.

Исследованные озера в значительной степени подвержены антропогенному воздействию со стороны городской среды, что, несомненно, сказывается на микроэлементном составе озерных вод. Наибольшее превышение условного фона в мурманских озерах обнаружено для V, Ni, Cu, Zn, Al, Mn, Fe, Sr, Rb, Ba. Самым загрязненным среди исследованных озер является оз. Ледовое, в котором зафиксированы максимальные концентрации большинства вышеперечисленных микроэлементов. Наименее подвержено антропогенному влиянию оз. Большое, использующееся в качестве одного из источников водоснабжения г. Мурманска. Подробное описание химического состава озер, в частности содержания главных ионов, биогенных элементов и микроэлементов, представлено в работах [Slukovskii et al., 2020; Даувальтер и др., 2021; Postevaya et al., 2021, 2023].

Сопряженное поступление макро- и микроэлементов в воды озер г. Мурманска

Проведенный корреляционный анализ показал высокие положительные коэффициенты корреляции между величиной минерализации (TDS) исследованных вод и содержанием всех главных ионов ($r = 0,90–0,98$ при $p = 0,001$ и $n = 80$), а также щелочных и щелочноземельных металлов, таких как Sr ($r = 0,98$), Li ($r = 0,93$), Rb ($r = 0,93$) и Ba ($r = 0,90$). Коэффициент корреляции между величиной pH и концентрациями щелочных и щелочноземельных металлов был ниже и варьировал от 0,61 до 0,78, между значениями pH и минерализации достигал 0,67.

Между концентрациями основных катионов и анионов в водах озер г. Мурманска выявлена тесная связь, при этом наиболее высокие коэффициенты корреляции наблюдаются между

ионами натрия и хлорид-ионами ($r = 1,00$) – главными компонентами морских аэрозолей [Моисеенко, Дину, 2020].

В свою очередь, данные ионы тесно коррелируют ($r = 0,85–0,93$ при $p = 0,001$) с концентрациями Li, Rb, Sr и Ba, что может указывать на их совместное поступление в водные объекты из морских аэрозолей и реагентов для противогололедной обработки городских дорог [Даувальтер и др., 2021]. Вместе с тем стронций в геохимических и биологических процессах сопряжен с кальцием, а рубидий является сопутствующим элементом калия [Моисеенко и др., 1997]. Высокая корреляция между щелочными и щелочноземельными металлами ($r = 0,83–0,98$) обусловливается схожестью их физико-химических свойств [Базова, 2016]. Так, например, Li и Rb обладают высокой химической активностью и способны мигрировать в городской среде из пород, слагающих водосборные территории, и осаждаться вместе с загрязняющими веществами [Слуковский, Светов, 2016].

Кислотонейтрализующая способность вод тесно коррелирует с показателями pH ($r = 0,74$) и минерализации ($r = 0,76$). В работе [Bazova, 2017] ранее отмечалось, что способность поверхностных вод противостоять закислению в условиях Кольского Севера обусловлена природным насыщением вод обменными основаниями (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) и поступлением на водосборные территории кислотообразующих соединений. Под воздействием сильных кислот снижается насыщение почв обменными основаниями, и, как следствие, их миграция в поверхностные воды становится ниже [Моисеенко, Дину, 2015]. В исследованных озерах г. Мурманска установлена положительная зависимость между показателем ANC и концентрациями Ca ($r = 0,83$), Mg ($r = 0,81$), K ($r = 0,87$), Na ($r = 0,66$). Коэффициент корреляции между кислотонейтрализующей способностью и содержанием сульфатов ($r = 0,56$) и хлоридов ($r = 0,62$) несколько ниже. Однако наибольшие коэффициенты корреляции величины ANC установлены с концентрациями гидрокарбонат-ионов ($r = 0,95$), а также с содержанием таких щелочных и щелочноземельных металлов, как Li ($r = 0,90$), Rb ($r = 0,89$), Sr ($r = 0,94$) и Ba ($r = 0,86$).

Общий органический углерод (TOC), показатели цветности и гумусности тесно коррелируют между собой, а также с содержанием органического аниона (A^-), Si, Fe, Al и редкоземельных элементов (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd). При этом отмечаются более высокие значения коэффициентов корреляции A^- с TOC (1,00)

и показателем гумусности ($r = 0,95$) по сравнению с цветностью ($r = 0,87$) озерных вод. В свою очередь, более тесная связь показателя цветности отмечается с концентрациями Fe ($r = 0,72$) и Al ($r = 0,66$). В ряде исследований установлено, что растворенное органическое вещество и Fe, входящие в состав природных вод бореальной зоны, являются основными факторами, определяющими цветность воды [Aschan, 1908; Kritzberg, Ekström, 2012; Xiao et al., 2015; Xiao, Riise, 2021]. В исследованных озерах г. Мурманска ТОС и Fe коррелируют с показателем цветности воды. Коэффициенты корреляции между цветностью и ТОС, а также цветностью и Fe составили 0,87 и 0,72 соответственно.

Несмотря на то что Fe^{3+} обладает низкой растворимостью в озерах со значением pH воды выше 3,5, оно способно образовывать комплексные соединения с растворенным органическим веществом при околонейтральных значениях pH [Shapiro, 1964; Neubauer et al., 2013; Лозовик и др., 2017; Дину, Баранов, 2022].

В то же время величина pH достоверно отрицательно коррелирует с показателем цветности и концентрациями Fe. Увеличение цветности озерных вод и уровня содержания Fe, вероятно образующего комплексные соединения с гумусовыми кислотами, приводит к снижению pH среды в сторону кислых значений [Moiseenko et al., 2020]. Однако данная зависимость имеет слабый характер, коэффициенты корреляции составляют $-0,42$ для Fe и $-0,37$ для цветности. Достоверной зависимости между pH и содержанием органического аниона в исследуемых озерах не выявлено.

Установлена слабая отрицательная корреляционная зависимость концентраций La, Pr, Nd, Sm, Gd ($r = 0,41-0,46$) от условий pH среды. Снижение значений величины pH приводит к увеличению содержания редкоземельных элементов в водоемах и водотоках [Sholkovitz, 1995; Gomes et al., 2022]. Слабый характер выявленной зависимости обуславливается тем, что на процесс поступления и накопления редкоземельных элементов в результате водной миграции также оказывает влияние значение Eh воды, ее химический состав, присутствие взвесей (коллоидов), процессы сорбции, десорбции и биоаккумуляции и др. [Казак и др., 2021].

С увеличением концентрации общего фосфора возрастает содержание общего азота ($r = 0,76$), ионов аммония и кремния ($r = 0,46$), что обусловлено процессами продукции и деструкции органического вещества в водных экосистемах.

Средняя положительная корреляционная связь установлена для следующих групп соединений: V–Ni ($r = 0,56$), V–Zn ($r = 0,63$), Ni–Cr ($r = 0,53$), Ni–Co ($r = 0,60$), Ni–Zn ($r = 0,54$). Данная зависимость может быть обусловлена как геологическим, так и антропогенными источниками поступления. Так, никель является главным сидерофильным элементом Балтийского кристаллического щита и в природных условиях геологически сопряжен с Co [Моисеенко и др., 1997; Янин и др., 2016]. В то же время Ni и V являются элементами – индикаторами сжигания мазута, используемого в г. Мурманске в качестве топлива для работы Мурманской ТЭЦ и котельных города [Zoller et al., 1973; Agrawal et al., 2008; Peltier, Lippmann, 2010]. В результате деятельности автотранспорта V также поступает в окружающую среду в составе твердых частиц, образующихся при неполном сгорании дизельного топлива [Shafer et al., 2012; Khussain et al., 2022]. Истирание шин и тормозных колодок автомобильного транспорта выступает источником обогащения дорожной пыли Zn [Саэт и др., 1990; Hwang et al., 2016]. Однако тут могут иметь место и специфические связи отдельных элементов, интерпретация которых возможна лишь при детальном анализе геохимии пород водосбора. Кроме того, не исключены случайные (даже ложные) корреляции, которые в принципе не поддаются объяснению.

Анализ факторов, влияющих на химический состав озерных вод г. Мурманска

Факторный анализ проводился методом главных компонент с последующим варимакс нормальным вращением полученных факторов. Метод главных компонент основывается на выявлении минимального числа факторов, обладающих наибольшим вкладом в общую дисперсию. Данный анализ позволяет сократить количество переменных и определить структуру взаимосвязей между ними [Sahoo et al., 2015].

Проведенный анализ главных компонент позволил выделить 4 основных фактора, объясняющих 82 % общей дисперсии. За значимые факторные нагрузки принимались те, квадрат коэффициента корреляции которых превышал значения 0,5 (при $p = 0,05$ и $n = 80$). Распределение факторных нагрузок представлено в таблице 3. Под величиной факторных нагрузок следует понимать коэффициенты корреляции между переменными и факторами. Чем больше абсолютное значение факторной нагрузки, тем сильнее связь данной переменной с фактором [Ким, 1989].

Таблица 3. Факторные нагрузки, собственные значения и процент объясняемой дисперсии выявленных факторов

Table 3. Factor loadings, eigenvalues, and percentage of explained variance of the identified factors

	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Фактор 3 Factor 3	Фактор 4 Factor 4
F	-0,605	-0,669	0,219	0,004
F _{бас}	0,144	-0,155	0,625	0,170
K _{гл}	0,573	0,350	-0,036	0,209
K _{откр}	-0,709	-0,602	0,155	-0,125
Δ F	0,669	0,424	0,226	0,057
pH	0,793	-0,316	-0,044	-0,176
TDS	0,977	-0,064	0,141	0,039
NH ₄	0,171	0,101	0,700	-0,124
Ca	0,961	-0,085	0,179	0,043
Mg	0,982	-0,091	0,100	-0,039
Na	0,952	-0,073	0,126	0,041
K	0,945	-0,207	0,196	0,003
HCO ₃	0,905	-0,146	0,308	-0,053
SO ₄	0,843	-0,282	-0,188	0,221
Cl	0,931	-0,093	0,135	0,046
TN	0,361	0,159	0,653	0,282
TP	0,231	0,256	0,801	0,090
Color	-0,106	0,949	0,024	-0,016
Гум	-0,060	0,960	0,020	-0,082
TOC	0,018	0,928	0,029	-0,174
Si	0,175	0,833	0,300	0,197
ANC	0,896	-0,094	0,309	-0,073
A	0,018	0,928	0,029	-0,174
Al	-0,024	0,753	0,076	0,325
Fe	-0,183	0,761	0,509	0,085
Li	0,954	0,118	0,143	-0,001
V	-0,006	0,216	0,161	0,772
Cr	0,491	0,327	0,079	0,290
Co	0,501	0,472	0,451	0,191
Ni	0,445	0,097	0,256	0,761
Cu	0,055	0,236	-0,218	0,424
Zn	0,017	0,499	0,125	0,660
Rb	0,923	-0,081	0,131	0,163
Sr	0,964	-0,083	0,195	0,049
Y	0,032	0,942	0,068	0,259
Mo	0,846	-0,017	-0,187	0,213
Ba	0,900	0,110	0,222	-0,016
La	-0,181	0,812	0,101	0,239
Pr	-0,106	0,909	0,093	0,305
Nd	-0,069	0,925	0,109	0,247
Sm	-0,078	0,929	0,068	0,259
Gd	-0,036	0,932	0,077	0,231
U	0,879	0,362	-0,179	0,056
Mn	0,009	0,326	0,715	-0,035
Собственные значения Eigenvalues	17,0	13,4	3,2	2,2
% объясняемой дисперсии % of explained variance	38,7	30,4	7,9	4,9

Примечание. Жирным шрифтом выделены факторные нагрузки > 0,5.

Note. Factor loadings > 0.5 are shown in bold.

Первый фактор имеет наибольшую информативность, на его долю приходится 38,7 % от общей объясняемой дисперсии. Данный фактор объединяет такие показатели, как pH, минерализация, кислотонейтрализующая способность вод, содержание главных ионов и некоторых микроэлементов (Sr, Li, Rb, Ba, U, Mo). Первый фактор отражает связь химического состава озерных вод с поступлением вышеперечисленных элементов с водосборных территорий. Поскольку исследованные озера располагаются на урбанизированных территориях, данный фактор отражает как природные (геологическое строение района исследования, морские аэрозоли Баренцева моря), так и антропогенные источники поступления главных ионов, а также щелочных и щелочноземельных металлов. Горные породы выступают в роли первичных источников основных ионов минерализации [Гашкина, 2014]. Геология района исследования представлена изверженными и метаморфическими разностями пород архея и протерозоя: граниты, гнейсы, жильные диабазы, габбро, амфиболиты [Атлас..., 1971]. Однако в условиях урбанизации в результате разрушения инфраструктуры, поступления ливневых вод, повышенной эрозии городских почв, применения противогололедных реагентов основные ионы, щелочные и щелочноземельные металлы с городской пылью, частицами почв или четвертичных отложений могут попадать в водоемы и водотоки [Даувальтер и др., 2021; Слуковский и др., 2023]. Кальцит, доломит, полевошпат, биотит, хлорид и другие минералы, обычно встречающиеся в строительных материалах, при взаимодействии с агрессивными условиями городской среды (например, кислотные дожди) высвобождают катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ [Wright et al., 2011; Camuffo, 2016; Kaushal et al., 2017, 2020]. В процессе разрушения бетонных сооружений в окружающую среду поступают ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} . Цемент, входящий в состав бетона, обладает высокой кислотонейтрализующей способностью (955 мг-экв $\text{CaCO}_3/\text{г}$) и способствует смещению pH среды озерных вод в сторону нейтральных и щелочных значений [Sephton, Webb, 2017; Kaushal et al., 2020].

Уран и молибден, также вошедшие в нагрузку первого фактора, имеют геологическое происхождение. Уран является ведущим литофильным элементом Фенноскандинавского щита [Янин и др., 2016]. Так, на северо-западе Мурманской области располагается Лицевский рудный район, характеризующийся урановыми рудопроявлениями и оруденениями [Ильченко и др., 2022]. Молибден выступает

в качестве сопутствующего элемента в урановых рудах и совместно мигрирует из магматических и метаморфических горных пород с урановым оруденением [Слуковский и др., 2020]. Похожие связи молибдена и урана ранее были установлены при изучении озер южной части Республики Карелия, которая также находится в пределах Фенноскандинавского щита [Slukovskii, 2023].

В первый фактор вошли и такие морфометрические характеристики озер, как площадь водного зеркала, показатель удельного водосбора, коэффициенты открытости и глубинности. Отрицательные значения факторной нагрузки площади водного зеркала свидетельствуют о влиянии слабоминерализованных атмосферных осадков, поступающих в исследованные озера. С увеличением площади водоема происходит снижение значений показателей, входящих в первый фактор. В свою очередь, показатель удельного водосбора демонстрирует обратную тенденцию в отношении первого фактора. Чем больше площадь водосбора по сравнению с площадью зеркала, тем сильнее влияние водосбора на режим водоема. Данная связь обусловлена структурой водного баланса озер. Коэффициент открытости имеет отрицательное значение факторной нагрузки, а коэффициент глубинности – положительное. Коэффициент открытости отражает степень перемешивания водных масс под воздействием климатических факторов, в особенности ветра. А коэффициент глубинности характеризует степень стратифицированности водной массы и различий гидрохимических показателей в поверхностных и придонных слоях озер.

Второй фактор также имеет определяющее влияние на формирование химического состава исследуемых озер. Доля данного фактора в общей дисперсии составляет 30,4 %. Фактор объединяет показатели цветности, гумусности и содержание TOC, Si, A^- , Al, Fe, Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd. Площадь водного зеркала и коэффициент открытости также демонстрируют отрицательные связи со вторым фактором. Наличие тесной связи между содержанием органического вещества и концентрациями Si, Fe, Al, редкоземельных элементов позволяет предположить протекание процессов комплексообразования с органическими кислотами в водах исследованных озер. Органические вещества, в особенности гуминовые и фульвовые кислоты, из-за особенностей их строения способны проявлять сильное сродство к комплексообразованию с гидроксидами Fe и Al, ионами металлов и редкоземельных элементов [Tang, Johannesson, 2003; Catrouillet et al.,

2019; Xiao, Riise, 2021; Lafrenière et al., 2023]. Так, способность редкоземельных элементов образовывать комплексы с гумусовыми веществами зависит от ряда факторов, среди которых – значения pH, концентрации растворенного органического вещества и ионная сила конкурирующих ионов [Tang, Johannesson, 2003]. В водоемах со слабокислой и кислой реакцией среды, а также высоким содержанием органического вещества редкоземельные элементы в большей степени образуют комплексные соединения органической природы [Johannesson et al., 2004; Гусева и др., 2012]. В щелочных водах (pH > 8,5) с низким содержанием органического вещества или преобладающим подземным типом питания редкоземельные элементы склонны образовывать комплексы с карбонатами и лигандами неорганического происхождения (гидроксиды Fe, Al, Mn) [Biddau et al., 2002; Lafrenière et al., 2023]. В свою очередь, гумусовые вещества при взаимодействии с ионами кремния способны образовывать устойчивые кремнийорганические соединения [Костикова и др., 2016]. В водоемах и водотоках гумидной зоны (Карелия) установлена линейная зависимость (коэффициент корреляции составил 0,85) между содержанием растворенного органического кремния и показателем гумусности, характеризующим органическое вещество аллохтонного происхождения [Рыжаков и др., 2019]. Таким образом, второй фактор обуславливает совместное поступление вышеперечисленных элементов в составе аллохтонного органического вещества и отражает влияние состава почв, слагающих водосборные территории исследуемых озер.

Процент третьего фактора от суммы общей объясняемой дисперсии составляет 7,9. Данный фактор объединил в себе гидрохимические показатели, которые демонстрируют тенденцию к накоплению в придонных слоях исследуемых озер, а именно NH_4 , TN, TP, Fe, Mn. Вероятно, третий фактор обуславливается эвтрофикацией исследованных озер, а также образованием восстановительных условий внутри водоемов. В процессе эвтрофирования в водных объектах происходит накопление биогенных веществ, в частности азота и фосфора, поступающих с водосборных территорий, о чем свидетельствует корреляция площади водосборного бассейна с третьим фактором. В придонных горизонтах кислород потребляется для разложения органического материала, что способствует образованию восстановительных условий [Даувальтер, 2006]. Железо и марганец чутко реагируют на изменение редокс-условий, в восстановительной обстановке способны

переходить в растворенное состояние и высвобождаться из донных отложений [Горленко и др., 1977].

Стоит отметить, что в данный фактор не вошли такие параметры, как коэффициенты глубинности и открытости озерной котловины, которые характеризуют степень перемешивания водных масс, возможности возникновения стратификации и различий концентраций химических показателей в поверхностных и придонных слоях водоемов [Лопух, Якушко, 2011]. Это, согласно результатам факторного анализа, исключает влияние сезонной стратификации и ветрового перемешивания водных масс на содержание и распределение NH_4 , TN, TP, Fe, Mn.

Четвертый фактор характеризуется наименьшим процентом (4,9 %) от общей объясняемой дисперсии. Несмотря на низкий вклад четвертого фактора в процент общей дисперсии, он отражает особенности локальной антропогенной нагрузки на водоемы и объединяет в себе такие металлы, как Ni, V и Zn.

Заключение

Таким образом, на основе выполненного статистического анализа данных установлено, что химический состав вод исследованных озер определяется комплексным воздействием природных и антропогенных факторов. При проведении корреляционного анализа выявлены закономерные зависимости показателей pH, минерализации, кислотонейтрализующей способности вод от содержания главных ионов, а также щелочных и щелочноземельных металлов в исследованных озерах. Установлена связь между косвенными показателями содержания органического вещества (ТОС, цветность, гумусность) и концентрациями типоморфных (Fe, Al) и редкоземельных (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd) элементов.

Метод главных компонент позволил выявить 4 значимых фактора, объясняющих 82 % общей дисперсии. Первые два фактора обладают наибольшей информативностью и объясняют соответственно 38,7 и 30,4 % от общей дисперсии. В свою очередь, третий (7,9) и четвертый (4,9) факторы характеризуются низким процентным вкладом в общую дисперсию. Первый фактор объединяет такие показатели, как pH, TDS, ANC, концентрации главных ионов и следующих микроэлементов: Sr, Li, Rb, Ba, U, Mo. Также в данный фактор вошли такие морфометрические показатели озер, как площадь водного зеркала, показатель удельного водосбора, коэффициенты открытости и глубинности.

Первый фактор отражает региональные особенности района исследования, в частности геологическое строение водосборных территорий и влияние морских аэрозолей, поступающих от Баренцева моря. Однако в связи с тем, что объекты исследования расположены на урбанизированной территории, из данного фактора нельзя исключать антропогенные источники поступления главных ионов, щелочных и щелочноземельных металлов. Второй фактор обуславливает влияние почвенного покрова на химический состав озерных вод и определяет совместное поступление Si, Al, Fe и редкоземельных элементов (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd) в составе аллохтонного органического вещества в исследованные озера. Третий фактор объединил в себе факторные нагрузки по следующим показателям: площадь водосборного бассейна и концентрации NH_4^+ , TN, TP, Fe, Mn в озерных водах. Вероятно, в качестве третьего фактора выступает процесс эвтрофикации озер, а также окислительно-восстановительные условия внутри водоемов. Четвертый фактор демонстрирует локальную антропогенную нагрузку (сжигание мазутного топлива, деятельность автомобильного транспорта) на водоемы и объединяет в себе микроэлементы техногенного происхождения (Ni, V, Zn).

Авторы искренне благодарят А. А. Черепанова за помощь в отборе проб и составлении карты территории исследований, а также Л. П. Кудрявцеву, А. С. Парамонова за качественные аналитические исследования.

Литература

- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 442 с.
- Атлас Мурманской области / Ред. В. Д. Милосердов и др. М.: ГУГК НИГЭИ ЛГУ, 1971. 33 с.
- Базова М. М. Геохимические закономерности формирования вод малых озер кольского региона в условиях аэротехногенного загрязнения: дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2016. 170 с.
- Гашкина Н. А. Пространственно-временная изменчивость химического состава вод малых озер в современных условиях изменения окружающей среды: дис. ... докт. геогр. наук. М., 2014. 207 с.
- Горленко В. М., Дубинина Г. А., Кузнецов С. И. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 289 с.
- Григорьев С. В. О некоторых определениях и показателях в озероведении // Труды Карельского филиала АН СССР. 1959. Вып. 18. С. 29–45.
- Гусева Н. В., Копылова Ю. Г., Леушина С. К. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах междуречья Юньяхи и Ензоряхи (восточный склон Полярного Урала) // Вода: химия и экология. 2012. № 12. С. 121–129.
- Даувальтер В. А. Исследование физического и химического состава донных отложений при оценке экологического состояния водоемов. Учеб. пособие по дисциплине «Геохимия окружающей среды». Мурманск: Изд-во МГТУ, 2006. 84 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: монография. В 3 ч. Ч. 2. Гидрохимия водоемов. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2014. 222 с.
- Даувальтер В. А., Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Черепанов А. А. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66, № 2. С. 252–266. doi: 10.21638/spbu07.2021.204
- Дину М. И., Баранов Д. Ю. Роль органических веществ гумусовой природы в формировании равновесных форм элементов в водах озер Кольского полуострова: экспериментальные исследования и расчетные результаты // Геохимия. 2022. Т. 67, № 1. С. 57–68. doi: 10.31857/S0016752522010058
- Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н., Каулина Т. В., Лялина Л. М., Ниткина Е. А., Мокрушина О. Д. Лицевское рудопроявление урана (арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые результаты петрофизических и геохимических исследований // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 393–404. doi: 10.31897/PMI.2022.44
- Казак Е. С., Лебедева Е. Г., Харитоновна Н. А., Челноков Г. А., Еловский Е. В. Фракционирование редкоземельных элементов и иттрия в водных средах: роль органотрофных бактерий // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2021. № 3. С. 99–112.
- Ким Д. О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Костикова Л. А., Шиян Л. Н., Мачехина К. И., Егоров Н. Б. Образование кремнийорганических соединений в процессах очистки воды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 1. С. 60–67.
- Кошелева О. Ю. Оценка запечатанности почвенного покрова города Волгограда // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2019. № 1. С. 12–18. doi: 10.17308/geo.2019.1/2280
- Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.
- Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Бородулина Г. С., Ефременко Н. А., Сабылина А. В., Зобков М. Б., Зайцев Д. О., Басова С. А., Калмыков М. В., Перская Е. А., Степанова И. А., Чесалина Г. Л., Родькина И. С., Кравченко И. Ю., Птица А. И., Галахина Н. Е., Зобкова М. В., Икко О. И., Ефремова Т. А., Кулик Н. В. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Ред. П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Лопух П. С., Якушко О. Ф. Общая лимнология: пособие для студентов геогр. фак. Минск: БГУ, 2011. 366 с.

- Моисеенко Т. И., Дауальтер В. А., Родюшкин И. В. Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 127 с.
- Моисеенко Т. И., Дауальтер В. А., Лукин А. А., Кудрявцева Л. П., Ильяшук Б. П., Ильяшук Л. И., Сандимиров С. С., Каган Л. Я., Вандыш О. И., Шаров А. Н., Шарова Ю. Н., Королева И. Н. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. 487 с.
- Моисеенко Т. И., Калабин Г. В., Хорошавин В. Ю. Закисление водосборов арктических регионов // Известия РАН. Сер. геогр. 2015. № 2. С. 49–58. doi: 10.15356/0373-2444-2012-2-49-58
- Моисеенко Т. И., Дину М. И. Феномен нарастания органических кислот в природных водах и их влияние на закисление вод // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460, № 5. С. 574–574. doi: 10.7868/S0869565215050205
- Моисеенко Т. И., Дину М. И., Гашкина Н. А., Кремлева Т. А., Хорошавин В. Ю. Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов // Геохимия. 2020. Т. 65, № 6. С. 521–532. doi: 10.31857/S0016752520060084
- Никаноров А. М. Гидрохимия. 2-е изд. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
- Порунов А. Н. Методика приведения ненормально распределенного ряда к нормальному распределению и оценка методической ошибки // Прикладная информатика. 2011. № 2(32). С. 3–11.
- Рыжаков А. В., Вапиров В. В., Степанова И. А. Кремний в поверхностных водах гумидной зоны (на примере водных объектов Карелии) // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 3. С. 52–60. doi: 10.17076/lim942
- Сает Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Л. Н., Трефилова Н. Я., Ачкасова А. И., Саркисян С. Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Слуковский З. И., Светов С. А. Геохимические индикаторы техногенного загрязнения донных отложений малых рек в урбанизированной среде // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 38–45.
- Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Дауальтер В. А., Зубова Е. М., Мязин В. А., Гузева А. В., Черепанов А. А., Постева М. А., Валькова С. А., Терентьев П. М., Фокина Н. В., Косова А. Л., Постнова С. В., Сошина А. С. Озера города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 174 с.
- Слуковский З. И., Гузева А. В., Дауальтер В. А., Удачин В. Н., Денисов Д. Б. Урановые аномалии в современных донных отложениях озер северной части Мурманской области, Арктика // Геохимия. 2020. Т. 65, № 12. С. 1231–1236. doi: 10.31857/S0016752520100131
- Черногаева Г. М., Жадановская Е. А., Журавлева Л. Р., Малеванов Ю. А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века. М.: Полиграф-Плюс, 2019. 232 с.
- Янин Е. П., Кузьмич В. Н., Иваницкий О. М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 6. С. 3–72.
- Agrawal H., Malloy Q. G. J., Welch W. A., Miller J. W., Cocker III D. R. In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel // Atmos. Environ. 2008. Vol. 42, no. 21. P. 5504–5510. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.053
- Algül F., Beyhan M. Concentrations and sources of heavy metals in shallow sediments in Lake Bafa, Turkey // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 1782. doi: 10.1038/s41598-020-68833-2
- Aschan O. Die wasserlöslichen Humusstoffe (Humussole) der nordischen Süßgewässer // J. Prakt. Chemie. 1908. Vol. 77(1). P. 172–188. doi: 10.1002/prac.19080770114
- Ayala-Borda P., Lovejoy C., Power M., Rautio M. Evidence of eutrophication in Arctic lakes // Arct. Sci. 2021. Vol. 7, no. 4. P. 859–871. doi: 10.1139/as-2020-0033
- Bazova M. M. Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North // Geochem. Int. 2017. Vol. 55, no. 1. P. 131–143. doi: 10.1134/S0016702917010025
- Biddau R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters from the albitite-bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy // Chem. Geol. 2002. Vol. 182, no. 1. P. 1–14. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00272-8
- Box G. E. P., Cox D. R. An analysis of transformations // J. R. Stat. Soc. B (Methodological). 1964. Vol. 26, no. 2. P. 211–252. doi: 10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x
- Camuffo D. Weathering of building materials // Urban Pollution and Changes to Materials and building surfaces. London: Imperial College Press, 2016. P. 19–64. doi: 10.1142/9781783268863_0002
- Catrouillet C., Guenet H., Pierson-Wickmann A. C., Dia A., Bouhnik-LeCoz M., Deville S., Lenne Q., Suko Ya., Davranche M. Rare earth elements as tracers of active colloidal organic matter composition // Environ. Chem. 2019. Vol. 17, no. 2. P. 133–139. doi: 10.1071/EN19159
- Clesceri L. S., Greenberg A. E., Eaton A. D. Standard methods for examination for water and wastewater. 20th ed. Washington: American Public Health Association USA, 1999. 2671 p.
- Gomes P., Valente T., Marques R., Prudêncio M. I., Pamplona J. Rare earth elements-Source and evolution in an aquatic system dominated by mine-Influenced waters // J. Environ. Manag. 2022. Vol. 322. Art. 116125. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116125
- Gradilla-Hernández M. S., de Anda J., García-Gonzalez A., Meza-Rodríguez D., Yebra Montes C., Perfecto-Avalos Y. Multivariate water quality analysis of Lake Cajititlán, Mexico // Environ. Monit. Assess. 2020. Vol. 192, no. 1. P. 5. doi: 10.1007/s10661-019-7972-4
- Henriksen A., Kämäri J., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters // Ambio. 1992. Vol. 21, no. 5. P. 356–363.

- Hwang H. M., Fiala M. J., Park D., Wade T. L. Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles // *Int. J. Urban Sci.* 2016. Vol. 20, no. 3. P. 334–360. doi: 10.1080/12265934.2016.1193041
- Johannesson K. H., Tang J., Daniels J. M., Bounds W. J., Burdige D. J. Rare earth element concentrations and speciation in organic-rich blackwaters of the Great Dismal Swamp, Virginia, USA // *Chem. Geol.* 2004. Vol. 209, no. 3–4. P. 271–294. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.012
- Kashulin N., Kashulina T., Bekkelund A. Long-term eutrophication and dynamics of bloom-forming microbial communities during summer HAB in large Arctic lake // *Environments*. 2021. Vol. 8, no. 8. P. 82. doi: 10.3390/environments8080082
- Kaushal S. S., Duan S., Doody T. R., Haq Sh., Smith R. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Gorman J., Bowman N., Mayer P. M., Wood K. L., Belt K. T., Stack W. P. Human-accelerated weathering increases salinization, major ions, and alkalization in fresh water across land use // *Appl. Geochem.* 2017. Vol. 83. P. 121–135. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.02.006
- Kaushal S. S., Wood K. L., Galella J. G., Gion A. M., Haq Sh., Goodling Ph. J., Haviland K. A., Reimer J. E., Morel C. J., Wessel B., Nguyen W., Hollingsworth J. W., Mei K., Leal J., Widmer J., Sharif R., Mayer P. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Smith E., Belt K. T. Making «chemical cocktails» – Evolution of urban geochemical processes across the periodic table of elements // *Appl. Geochem.* 2020. Vol. 119. P. 104632. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104632
- Khan M. S. I., Islam N., Uddin J., Islam S., Kamal Nasir M. Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34, no. 8. P. 4773–4781. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.003
- Khussain B., Brodskiy A., Sass A., Rakhmetova K., Yaskevich V., Grigor'eva V., Ishmukhamedov A., Shapovalov A., Shlygina I., Tungatarova S., Khussain A. Synthesis of vanadium-containing catalytically active phases for exhaust gas neutralizers of motor vehicles and industrial enterprises // *Catalysts*. 2022. Vol. 12, no. 8. Art. 842. doi: 10.3390/catal12080842
- Kritzberg E. S., Ekström S. M. Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? // *Biogeosci.* 2012. Vol. 9, no. 4. P. 1465–1478. doi: 10.5194/bg-9-1465-2012
- Lafrenière M. C., Lapierre J. F., Ponton D. E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2023. Vol. 353. P. 129–141. doi: 10.1016/j.gca.2023.05.019
- Li G., Li X., Jiang X., Zhang Y., Li H., Zhang J., Cai G., Luo K., Xie F. Occurrence and source analysis of heavy metals and dissolved organic matter in Nanyi Lake, Anhui Province // *Environ. Monit. Assess.* 2023. Vol. 195. Art. 660. doi: 10.1007/s10661-023-11226-5
- Moiseenko T. I. Anthropogenic processes in continental waters of Arctic regions and criteria for their assessment // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. P. 578–588. doi: 10.1134/S032105961804017X
- 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. Vol. 12, no. 6. P. 1659. doi: 10.3390/w12061659
- 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. Vol. 14, no. 21. P. 3467. doi: 10.3390/w14213467
- Neubauer E., Köhler S. J., von der Kammer F., Laudon H., Hofmann T. Effect of pH and stream order on iron and arsenic speciation in boreal catchments // *Environ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 47, no. 13. P. 7120–7128. doi: 10.1021/es401193j
- Oliver B. G., Thurman E. M., Malcolm R. L. The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. Vol. 47, no. 11. P. 2031–2035. doi: 10.1016/0016-7037(83)90218-1
- Osadchyy V., Nabyvanets B., Osadcha N., Nabyvanets Y., Linnik P. Processes determining surface water chemistry. Amsterdam: Springer Int. Publ., 2016. 265 p. doi: 10.1007/978-3-319-42159-9
- Peltier R. E., Lippmann M. Residual oil combustion: 2. Distributions of airborne nickel and vanadium within New York City // *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2010. Vol. 20. P. 342–350. doi: 10.1038/jes.2009.28
- Postevaya M. A., Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Bernadskaya D. S. Estimation of heavy metal concentrations in the water of urban lakes in the Russian Arctic (Murmansk) // *Water*. 2021. Vol. 13, no. 22. P. 3267. doi: 10.3390/w13223267
- Postevaya M., Dauvalter V., Slukovskii Z., Kudryavtseva L. Chemical composition and trophic status of urban lakes of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk) // *Ecohydrology*. 2023. Vol. 16, no. 2. e2505. doi: 10.1002/eco.2505
- Sahoo M. M., Patra K. C., Khatua K. K. Inference of water quality index using ANFIA and PCA // *Aquatic Procedia*. 2015. Vol. 4. P. 1099–1106. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.139
- Sephton M. G., Webb J. A. Application of Portland cement to control acid mine drainage generation from waste rocks // *Appl. Geochem.* 2017. Vol. 81. P. 143–154. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.03.017
- Shafer M. M., Toner B. M., Overdier J. T., Schauer J. J., Fakra S. C., Hu Sh., Herner J. D., Ayala A. Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols // *Environ. Sci. Technol.* 2012. Vol. 46, no. 1. P. 189–195. doi: 10.1021/es200463c
- Shapiro J. Effect of yellow organic acids on iron and other metals in water // *J. Am. Water Works Ass.* 1964. Vol. 56, no. 8. P. 1062–1082. doi: 10.1002/j.1551-8833.1964.tb01303.x
- Sholkovitz E. R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries // *Aquat. Geochem.* 1995. Vol. 1. P. 1–34. doi: 10.1007/BF01025229

Skjelkvåle B. L., Bishop K., Laudon H., Wilander A., Yakovlev V. Effects on freshwater ecosystems // AMAP Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo: Norway, 2007. 112 p.

Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A., Denisov D., Cherepanov A., Siroezhko E. The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia // *Water*. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 1130. doi: 10.3390/w12041130

Slukovskii Z. Uranium in lake sediments of humid zone: A case study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia) // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 7. P. 1360. doi: 10.3390/w15071360

Tang J., Johannesson K. H. Speciation of rare earth elements in natural terrestrial waters: assessing the role of dissolved organic matter from the modeling approach // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003. Vol. 67, no. 13. P. 2321–2339. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01413-8

Wright I. A., Davies P. J., Findlay S. J., Jonasson O. J. A new type of water pollution: concrete drainage infrastructure and geochemical contamination of urban waters // *Mar. Freshwater Res.* 2011. Vol. 62, no. 12. P. 1355–1361. doi: 10.1071/MF10296

Xiao Y., Riise G. Coupling between increased lake color and iron in boreal lakes // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 767. Art. 145104. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145104

Xiao Y. H., Räsäe A., Hartikainen H., Vähätalo A. V. Iron as a source of color in river waters // *Sci. Total Environ.* 2015. Vol. 536. P. 914–923. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.092

Yevtushenko N. Y., Dudnyk S. V., Rudyk-Leuska N. Y., Khyzhniak M. I. Factors determining the degree of heavy metals' toxicity to fish (a review) // *Hydrobiol. J.* 2021. Vol. 57, no. 4. P. 75–85. doi: 10.1615/HydrobJ.v57.i4.70

Zoller W. H., Gordon G. E., Gladney E. S., Jones I. A. G. The sources and distribution of vanadium in the atmosphere // *Trace Elements in the Environment*. Ch. 3. Washington: American Chemical Society, 1973. P. 31–47. doi: 10.1021/ba-1973-0123.ch003

References

Agrawal H., Malloy Q. G. J., Welch W. A., Miller J. W., Cocker III D. R. In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel. *Atmos. Environ.* 2008;42(21):5504–5510. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.053

Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1970. 442 p. (In Russ.)

Algül F., Beyhan M. Concentrations and sources of heavy metals in shallow sediments in Lake Bafa, Turkey. *Scientific Reports*. 2020;10(1):1782. doi: 10.1038/s41598-020-68833-2

Aschan O. Soluble humus material of northern fresh waters. *J. Prakt. Chemie*. 1908;77(1):172–188. (In German). doi: 10.1002/prac.19080770114

Ayala-Borda P., Lovejoy C., Power M., Rautio M. Evidence of eutrophication in Arctic lakes. *Arct. Sci.* 2021;7(4):859–871. doi: 10.1139/as-2020-0033

Bazova M. M. Geochemical patterns of water formation in small lakes of the Kola region under conditions

of aerotechnogenic pollution: DSc. (Cand. of Geol.-Miner.). Moscow; 2016. 170 p. (In Russ.)

Bazova M. M. Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North. *Geochem. Int.* 2017;55(1):131–143. doi: 10.1134/S0016702917010025

Biddau R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters from the albitite-bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy. *Chem. Geol.* 2002;182(1):1–14. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00272-8

Box G. E. P., Cox D. R. An analysis of transformations. *J. R. Stat. Soc. B (Methodological)*. 1964;26(2): 211–252. doi: 10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x

Camuffo D. Weathering of building materials. *Urban Pollution and Changes to Materials and building surfaces*. London: Imperial College Press; 2016. P. 19–64. doi: 10.1142/9781783268863_0002

Catrouillet C., Guenet H., Pierson-Wickmann A. C., Dia A., Bouhnik-LeCocq M., Deville S., Lenne Q., Suko Ya., Davranche M. Rare earth elements as tracers of active colloidal organic matter composition. *Environ. Chem.* 2019;17(2):133–139. doi: 10.1071/EN19159

Chernogaeva G. M., Zhadanovskaya E. A., Zhuravleva L. R., Malevanov Yu. A. Environmental pollution in regions of Russia at the beginning of the 21st century. Moscow: Poligraf-Plyus; 2019. 232 p. (In Russ.)

Clescerl L. S., Greenberg A. E., Eaton A. D. Standard methods for examination for water and wastewater. 20th ed. Washington: American Public Health Association USA; 1999. 2671 p.

Dauvalter V. A. Study of the physical and chemical composition of bottom sediments when assessing the ecological state of reservoirs. A study guide for the course of Environmental Geochemistry. Murmansk: MSTU; 2006. 84 p. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Geoecology of lakes in the Murmansk Region: monograph. In 3 vol. Part 2. Hydrochemistry of reservoirs. Murmansk: MSTU; 2014. 222 p. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Slukovskii Z. I., Denisov D. B., Cherepanov A. A. Features of the chemical composition of water in urban lakes in Murmansk. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg University. Geosciences*. 2021;66(2):252–266. (In Russ.). doi: 10.21638/spbu07.2021.204

Dinu M. I., Baranov D. Y. The role of organic substances of humus nature in the formation of equilibrium forms of elements in the waters of the Kola Peninsula lakes: experimental studies and calculated results. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2022;67(1):57–68. (In Russ.). doi: 10.31857/S0016752522010058

Gashkina N. A. Spatiotemporal variability of the chemical composition of waters of small lakes in modern conditions of environmental change: DSc. (Dr. of Geogr.) thesis. Moscow; 2014. 207 p. (In Russ.)

Gomes P., Valente T., Marques R., Prudêncio M. I., Pamplona J. Rare earth elements-Source and evolution in an aquatic system dominated by mine-Influenced waters. *J. Environ. Manag.* 2022;322:116125. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116125

- Gorlenko V. M., Dubinina G. A., Kuznetsov S. I. Ecology of aquatic microorganisms. Moscow: Nauka; 1977. 289 p. (In Russ.)
- Gradilla-Hernández M. S., de Anda J., Garcia-Gonzalez A., Meza-Rodríguez D., Yebra Montes C., Perfecto-Avalos Y. Multivariate water quality analysis of Lake Cajititlán, Mexico. *Environ. Monit. Assess.* 2020;192(1):5. doi: 10.1007/s10661-019-7972-4
- Grigoriev S. V. On some definitions and indicators in lake science. *Trudy Karelskogo filiala AN SSSR = Proceedings of the Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences.* 1959;18:29–45. (In Russ.)
- Guseva N. V., Kopylova Yu. G., Leushina S. K. Prevalence of rare earth elements in natural waters between the Yuniyakh and Enzoryakh rivers (eastern slope of the Polar Urals). *Voda: khimiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology.* 2012;12:121–129. (In Russ.)
- Henriksen A., Kämäri J., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters. *Ambio.* 1992;21(5):356–363.
- Hwang H. M., Fiala M. J., Park D., Wade T. L. Review of pollutants in urban road dust and storm-water runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles. *Int. J. Urban Sci.* 2016;20(3):334–360. doi: 10.1080/12265934.2016.1193041
- Ilchenko V. L., Afanasyeva E. N., Kaulina T. V., Lyalina L. M., Nitkina E. A., Mokrushina O. D. The Litsevskeye uranium ore manifestation (Arctic zone of the Fennoscandian Shield): new results of petrophysical and geochemical studies. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute.* 2022;255:393–404. (In Russ.). doi: 10.31897/PMI.2022.44
- Johannesson K. H., Tang J., Daniels J. M., Bounds W. J., Burdige D. J. Rare earth element concentrations and speciation in organic-rich blackwaters of the Great Dismal Swamp, Virginia, USA. *Chem. Geol.* 2004;209(3-4):271–294. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.012
- Kashulin N., Kashulina T., Bekkelund A. Long-term eutrophication and dynamics of bloom-forming microbial communities during summer HAB in large Arctic lake. *Environments.* 2021;8(8):82. doi: 10.3390/environments8080082
- Kaushal S. S., Duan S., Doody T. R., Haq Sh., Smith R. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Gorman J., Bowman N., Mayer P. M., Wood K. L., Belt K. T., Stack W. P. Human-accelerated weathering increases salinization, major ions, and alkalization in fresh water across land use. *Appl. Geochem.* 2017;83:121–135. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.02.006
- Kaushal S. S., Wood K. L., Galella J. G., Gion A. M., Haq Sh., Goodling Ph. J., Haviland K. A., Reimer J. E., Morel C. J., Wessel B., Nguyen W., Hollingsworth J. W., Mei K., Leal J., Widmer J., Sharif R., Mayer P. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Smith E., Belt K. T. Making «chemical cocktails» – Evolution of urban geochemical processes across the periodic table of elements. *Appl. Geochem.* 2020;119:104632. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104632
- Kazak E. S., Lebedeva E. G., Kharitonova N. A., Chelnokov G. A., Elovsky E. V. Fractionation of rare earth elements and yttrium in aquatic environments: the role of organotrophic bacteria. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya = Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology.* 2021;3:99–112. (In Russ.)
- Khan M. S. I., Islam N., Uddin J., Islam S., Kamal Nasir M. Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences.* 2022;34(8):4773–4781. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.003
- Khussain B., Brodskiy A., Sass A., Rakhmetova K., Yaskevich V., Grigor'eva V., Ishmukhamedov A., Shapovalov A., Shlygina I., Tungatarova S., Khussain A. Synthesis of vanadium-containing catalytically active phases for exhaust gas neutralizers of motor vehicles and industrial enterprises. *Catalysts.* 2022;12(8):842. doi: 10.3390/catal12080842
- Kim D. O. Factorial, discriminant, and cluster analysis. Moscow: Finansy i statistika; 1989. 215 p. (In Russ.)
- Kosheleva O. Yu. Assessment of soil cover sealing in the city of Volgograd. *Vestnik VGU. Ser. Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of VSU. Series: Geography. Geoecology.* 2019;1:12–18. (In Russ.). doi: 10.17308/geo.2019.1/2280
- Kostikova L. A., Shiyan L. N., Machekhina K. I., Egorov N. B. Formation of organosilicon compounds in water purification processes. *Izvestiya TPU. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2016;327(1):60–67. (In Russ.)
- Kritzbeg E. S., Ekström S. M. Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? *Biogeosci.* 2012;9(4):1465–1478. doi: 10.5194/bg-9-1465-2012
- Lafrenière M. C., Lapierre J. F., Ponton D. E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2023;353:129–141. doi: 10.1016/j.gca.2023.05.019
- Li G., Li X., Jiang X., Zhang Y., Li H., Zhang J., Cai G., Luo K., Xie F. Occurrence and source analysis of heavy metals and dissolved organic matter in Nanyi Lake, Anhui Province. *Environ. Monit. Assess.* 2023;195:660. doi: 10.1007/s10661-023-11226-5
- Lopukh P. S., Yakushko O. F. General limnology: a manual for geography students. Minsk: BSU; 2011. 366 p. (In Russ.)
- Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria for the state of surface waters in the humid zone and their resilience to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)
- Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Borodulina G. S., Efremenko N. A., Sabylina A. V., Zobkov M. B., Zaitsev D. O., Basova S. A., Kalmykov M. V., Perskaya E. A., Stepanova I. A., Chesalina G. L., Rod'kina I. S., Kravchenko I. Yu., Ptitsa A. I., Galakhina N. E., Zobkova M. V., Ikko O. I., Efremova T. A., Kulik N. V. Analytical, kinetic, and calculation methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)
- Miloserdov V. D. et al. (eds.). Atlas of the Murmansk Region. Moscow: GUGK NIGEL LGU; 1971. 33 p. (In Russ.)

- Moiseenko T. I. Anthropogenic processes in continental waters of Arctic regions and criteria for their assessment. *Water Resources*. 2018;45:578–588. doi: 10.1134/S032105961804017X
- 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(21):3467. doi: 10.3390/w14213467
- Moiseenko T. I., Dauvalter V. A., Rodyushkin I. V. Geochemical migration of elements in a subarctic water body (a case study of Lake Imandra). Apatity: KSC RAS; 1997. 127 p. (In Russ.)
- Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Lukin A. A., Kudryavtseva L. P., Il'yashchuk B. P., Il'yashchuk L. I., Sandimirov S. S., Kagan L. Ya., Vandysh O. I., Sharov A. N., Sharova Yu. N., Koroleva I. N. Anthropogenic modifications of the ecosystem of Lake Imandra. Moscow: Nauka; 2002. 487 p. (In Russ.)
- Moiseenko T. I., Dinu M. I. The phenomenon of increasing organic acids in natural waters and their impact on water acidification. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2015;460(5):574–578. (In Russ.). doi: 10.7868/S0869565215050205
- Moiseenko T. I., Dinu M. I., Gashkina N. A., Kremleva T. A., Khoroshavin V. Y. Geochemical features of elements distributions in the lake waters of the Arctic Region. *Geochem. Int.* 2020;58(6):613–623. doi: 10.1134/S0016702920060087
- 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;12(6):1659. doi: 10.3390/w12061659
- Moiseenko T. I., Kalabin G. V., Khoroshavin V. Yu. Acidification of catchments in Arctic regions. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2015;2: 49–58. (In Russ.). doi: 10.15356/0373-2444-2012-2-49-58
- Neubauer E., Köhler S. J., von der Kammer F., Laudon H., Hofmann T. Effect of pH and stream order on iron and arsenic speciation in boreal catchments. *Environ. Sci. Technol.* 2013;47(13):7120–7128. doi: 10.1021/es401193j
- Nikanorov A. M. Hydrochemistry. 2nd ed. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2001. 444 p. (In Russ.)
- Oliver B. G., Thurman E. M., Malcolm R. L. The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983;47(11): 2031–2035. doi: 10.1016/0016-7037(83)90218-1
- Osadchyy V., Nabyvanets B., Osadcha N., Nabyvanets Y., Linnik P. Processes determining surface water chemistry. Amsterdam: Springer Int. Publ.; 2016. 265 p. doi: 10.1007/978-3-319-42159-9
- Peltier R. E., Lippmann M. Residual oil combustion: 2. Distributions of airborne nickel and vanadium within New York City. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2010;20:342–350. doi: 10.1038/jes.2009.28
- Porunov A. N. Methodology for transforming a non-normally distributed series into a normal distribution and estimating methodological error. *Prikladnaya informatika = Applied Informatics*. 2011;2(32):3–11. (In Russ.)
- Postevaya M., Dauvalter V., Slukovskii Z., Kudryavtseva L. Chemical composition and trophic status of urban lakes of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk). *Ecohydrology*. 2023;16(2):e2505. doi: 10.1002/eco.2505
- Postevaya M. A., Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Bernadskaya D. S. Estimation of heavy metal concentrations in the water of urban lakes in the Russian Arctic (Murmansk). *Water*. 2021;13(22):3267. doi: 10.3390/w13223267
- Ryzhakov A. V., Vapirov V. V., Stepanova I. A. Silicon in surface waters of the humid zone (the case of Karelian water bodies). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;3:52–60. (In Russ.). doi: 10.17076/lim942
- Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P., Smirnova R. S., Basharkevich I. L., Onishchenko T. L., Pavlova L. N., Trefilova N. Ya., Achkasova A. I., Sarkisyan S. Sh. Geochemistry of the environment. Moscow: Nedra; 1990. 335 p. (In Russ.)
- Sahoo M. M., Patra K. C., Khatua K. K. Inference of water quality index using ANFIA and PCA. *Aquatic Procedia*. 2015;4:1099–1106. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.139
- Sephton M. G., Webb J. A. Application of Portland cement to control acid mine drainage generation from waste rocks. *Appl. Geochem.* 2017;81:143–154. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.03.017
- Shafer M. M., Toner B. M., Overdier J. T., Schauer J. J., Fakra S. C., Hu Sh., Herner J. D., Ayala A. Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols. *Environ. Sci. Technol.* 2012;46(1): 189–195. doi: 10.1021/es200463c
- Shapiro J. Effect of yellow organic acids on iron and other metals in water. *J. Am. Water Works Ass.* 1964;56(8):1062–1082. doi: 10.1002/j.1551-8833.1964.tb01303.x
- Sholkovitz E. R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquat. Geochem.* 1995;1:1–34. doi: 10.1007/BF01025229
- Skjelkvåle B. L., Bishop K., Laudon H., Wilander A., Yakovlev V. Effects on freshwater ecosystems. *AMAP Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme*. Oslo: Norway; 2007. 112 p.
- Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A., Denisov D., Cherepanov A., Siroezhko E. The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia. *Water*. 2020;12(4):1130. doi: 10.3390/w12041130
- Slukovskii Z. I., Denisov D. B., Dauval'ter V. A., Zubova E. M., Myazin V. A., Guzeva A. V., Cherepanov A. A., Postevaya M. A., Val'kova S. A., Terent'ev P. M., Fokina N. V., Kosova A. L., Postnova S. V., Soshina A. S. Lakes of the city of Murmansk: hydrological, hydrochemical, and hydrobiological features. Apatity: KSC RAS; 2023. 174 p. (In Russ.)
- Slukovskii Z. I., Svetov S. A. Geochemical indicators of anthropogenic pollution in bottom sediments of small rivers in urbanized environments. *Geografiya*

i prirodnye resursy = *Geography and Natural Resources*. 2016;1:38–45. (In Russ.)

Slukovskii Z. Uranium in lake sediments of humid zone: A case study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia). *Water*. 2023;15(7):1360. doi: 10.3390/w15071360

Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Guzeva A. V., Udachin V. N. Uranium anomalies in recent sediments of lakes from the northern part of the Murmansk Region, Arctic. *Geochemistry International*. 2020;58(12):1374–1378. doi: 10.1134/S0016702920100134

Tang J., Johannesson K. H. Speciation of rare earth elements in natural terrestrial waters: assessing the role of dissolved organic matter from the modeling approach. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003;67(13):2321–2339. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01413-8

Wright I. A., Davies P. J., Findlay S. J., Jonasson O. J. A new type of water pollution: concrete drainage infrastructure and geochemical contamination of urban waters. *Mar. Freshwater Res.* 2011;62(12):1355–1361. doi: 10.1071/MF10296

Xiao Y., Riise G. Coupling between increased lake color and iron in boreal lakes. *Sci. Total Environ.* 2021;767:145104. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145104

Xiao Y. H., Räsänen A., Hartikainen H., Vähätalo A. V. Iron as a source of color in river waters. *Sci. Total Environ.* 2015;536:914–923. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.092

Yanin E. P., Kuzmich V. N., Ivanitsky O. M. Regional natural inhomogeneity of the chemical composition of surface waters on land and the necessity of considering it in assessments of their ecological state and intensity of anthropogenic pollution. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnkh resursov* = *Problems of Environmental Science and Natural Resources*. 2016;6:3–72. (In Russ.)

Yevtushenko N. Y., Dudnyk S. V., Rudyk-Leuska N. Y., Khyzhniak M. I. Factors determining the degree of heavy metals' toxicity to fish (a review). *Hydrobiol. J.* 2021;57(4):75–85. doi: 10.1615/HydrobJ.v57.i4.70

Zoller W. H., Gordon G. E., Gladney E. S., Jones A. G. The sources and distribution of vanadium in the atmosphere. *Trace Elements in the Environment*. Ch. 3. Washington: American Chemical Society; 1973. P. 31–47. doi: 10.1021/ba-1973-0123.ch003

Поступила в редакцию / received: 21.07.2024; принята к публикации / accepted: 25.10.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Постева Мария Алексеевна

младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии и рационального природопользования Арктики ИППЭС КНЦ РАН, старший преподаватель кафедры биологии и биоресурсов МАУ

e-mail: Postevaya.ma@yandex.ru

Даувальтер Владимир Андреевич

д-р геогр. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэкологии и рационального природопользования Арктики

e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

Слуковский Захар Иванович

канд. биол. наук, заведующий лабораторией геоэкологии и рационального природопользования Арктики

e-mail: slukovsky87@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Postevaya, Marina

Junior Researcher, INEP KSC RAS, Senior Lecturer at the Department of Biology and Bioresources, MAU

Dauvalter, Vladimir

Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Chief Researcher

Slukovskii, Zakhar

Cand. Sci. (Biol.), Head of Laboratory