

Микроэлементный состав поверхностных вод острова Кильдин, Мурманская область

Дауальтер В. А. ^{id}, Адамская П. Н. ^{id}, Банникова Ю. М. ^{id}, Слуковский З. И. ^{id}, Елизарова И. Р.
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, v.dauvalter@ksc.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты впервые проведенных исследований микроэлементного состава 12 водных объектов (8 озер и 4 ручья) поверхностных вод острова Кильдин, расположенного в полутора км к востоку от выхода Кольского залива в Баренцево море. Согласно ранее проведенным геологическим исследованиям, остров сложен метаморфизованными осадочными породами, датированными средним, поздним рифеем и вендом. В породах острова выявлена сульфидная минерализация, включающая тяжелые металлы в составе сульфидов, а также установлена геохимическая специализация фосфоритов, характеризующаяся присутствием редкоземельных элементов, Zr и Hf. На острове Кильдин находится реликтовое озеро Могильное, примечательное наличием плотностной стратификации с высокими значениями градиента плотности, вследствие чего толща воды в озере имеет несколько слоев воды разной солености, от почти пресной на поверхности (соленость не более 3 ‰) до солености более 30 ‰ в придонном слое, характеризующегося наличием анаэробного сероводородного слоя. Микроэлементный состав в воде водных объектах определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Наибольшие содержания щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Rb, Sr, Cs и Ba), а также тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Sb, V, Ti, Bi, U, Nb, W, Mo), были зафиксированы в оз. Могильное, что объясняется просачиванием морской воды сквозь узкую перемычку, сложенную валунно-галечными морскими отложениями с высокими коэффициентами фильтрации. Наибольшие содержания всех редкоземельных элементов, а также Cd, Zr и Hf, обнаружены в воде озера Последнее, что связано с особенностями геохимического состава коренных горных пород в центральной части острова Кильдин. Корреляционный и факторный анализы подтвердили влияние этих двух факторов на формирование микроэлементного состава поверхностных вод острова Кильдин.

Ключевые слова: Арктика, остров Кильдин, озеро Могильное, поверхностные воды, микроэлементный состав.

Microelement Region composition of surface waters of Island Kildin, Murmansk Region

Dauvalter V. A. ^{id}, Adamskaya P. N. ^{id}, Bannikova Yu. M. ^{id}, Slukovski Z. I. ^{id}, Elizarova I. R.
Institute of North Industrial Ecology Problems Kola SC RAS, Apatity, v.dauvalter@ksc.ru

Abstract. The article provides a description of results of the first studies of the trace element composition of 12 water bodies (8 lakes and 4 streams) of the surface waters of Island Kildin, located 1.5 km to the east of the outlet of the Kola Bay into the Barents Sea. According to previously conducted geological studies, the island is composed of metamorphosed sedimentary rocks dated by the Middle, Late Riphean and Vendian. Sulfide mineralization was identified in these rocks, and geochemical specialization of phosphorites, which are characterized by presence of rare earth elements, Zr and Hf, was classified. On Island Kildin there is a relict Lake Mogilnoye, notable for the presence of density stratification with high values of the density gradient, as a result of which the water column in the lake has several layers of water of different salinity, from almost fresh on the surface (salinity no more than 3 ‰) to salinity of more than 30 ‰ at the bottom layer, characterized by the presence of an anaerobic hydrogen sulfide. The trace element composition in the water objects was determined by the method of mass spectrometry with inductively coupled plasma. The highest contents of alkaline and alkaline earth metals (Li, Rb, Sr, Cs and Ba), as well as heavy metals (Ni, Cu, Co, Sb, V, Ti, Bi, U, Nb, W, Mo) were recorded in Lake Mogilnoye, which is explained by the seepage of sea water through a narrow isthmus composed of boulder-pebble marine sediments with a high filtration coefficient. The highest contents of all rare earth elements, as well as Cd, Zr and Hf, were found in the water of Lake Poslednee, which is associated with the peculiarities of the geochemical composition of the bedrock in the central part of Island Kildin. Correlation and factor analysis confirmed the influence of these two factors on the formation of the trace element composition of the surface waters of Island Kildin.

Keywords: Arctic, Island Kildin, Lake Mogilnoye, surface waters, trace element composition.

Введение

Мурманская область является крайним северо-западным регионом России, расположенным в Арктической зоне и имеющим большое число озер (более 110 тысяч). Западная часть Мурманской области относится к одному из самых урбанизированных регионов страны с развитой горнодобывающей и металлургической промышленностью, а восточную часть области можно отнести к фоновому району с незначительным антропогенным влиянием на окружающую среду. Информации о таких территориях и находящихся на них водных объектах на данный момент недостаточно, при довольно большом объеме лимнологических исследованиях в Мурманской области. Химический состав фоновых озер Мурманской области и особенно содержание в них микроэлементов остается недостаточно изученным. Геологическое строение Мурманской области характеризуется наличием разнообразных структур со своими геохимическими особенностями и ассоциациями химических элементов на территории водосборов озер, что сказывается на их химическом составе. Обновление приборной базы в последние годы и наличие современного аналитического высокоточного оборудования в Кольском научном центре РАН дает возможность углубленного исследования химического и микроэлементного состава водных объектов, в том числе и фоновых, незатронутых антропогенной деятельностью территорий.

Целью впервые проведенных гидрохимических исследований является определение содержания более 40 микроэлементов в водных объектах острова Кильдин высокоточным методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и установление основных факторов формирования микроэлементного состава этого фонового района, находящегося в Арктической зоне Российской Федерации.

Остров Кильдин

Остров Кильдин расположен в 1.5 км от Мурманского берега Кольского п-ова к востоку от выхода Кольского залива Баренцева моря (рис. 1). Длина острова 17.6 км, ширина до 7 км. Остров представляет собой холмистое плато высотой до 280 м.

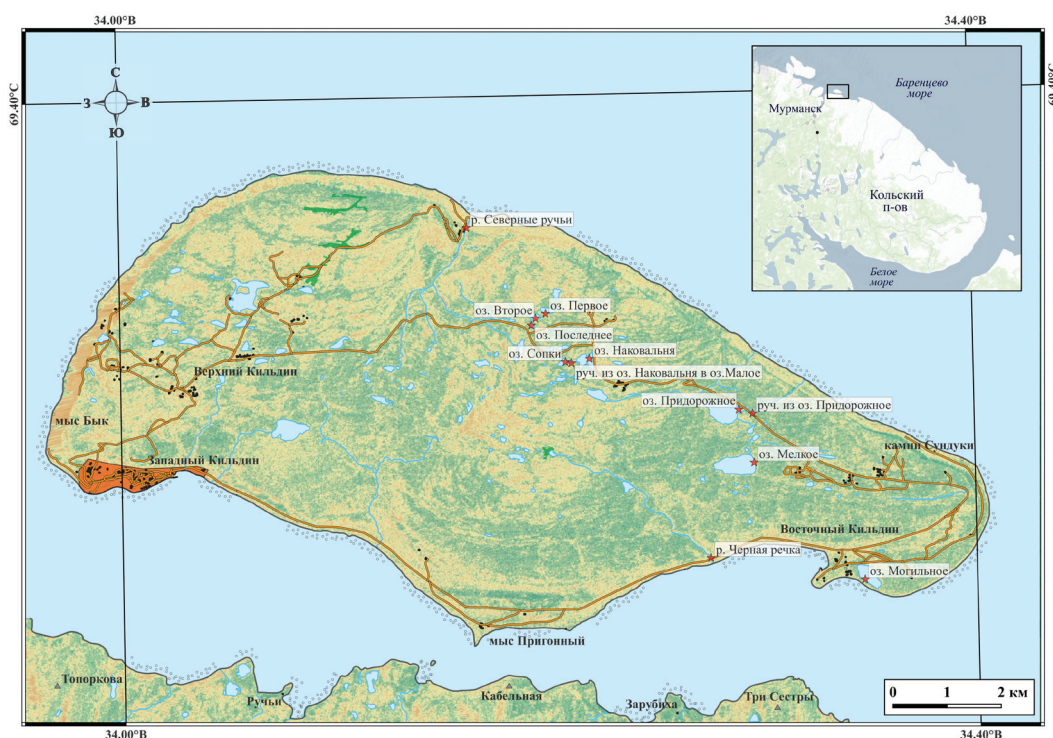


Рис. 1. Карта-схема отбора проб поверхностных вод о-ва Кильдин (автор М. Шестаков)

Fig. 1. Map-scheme of sampling of surface waters of Kildin Island (author M. Shestakov)

Удобное географическое положение о-ва Кильдин и разнообразие природных ресурсов в омывающих его водах Баренцева моря является причиной освоения острова, которое началось несколько тысячелетий назад. На о-ве Кильдин в результате исследований многочисленных экспедиций обнаружены археологические свидетельства, относящиеся почти ко всем эпохам человеческой истории – от памятников мезолита (среднего каменного века) до артефактов позднего Средневековья и Нового времени (Остров..., 2025). Расположение о-ва Кильдин позволяет контролировать выход из Кольского залива и морские коммуникации к востоку от него, что определяет его военное значение. До распада Советского Союза на острове располагались воинские части, и в течение последних 30 лет антропогенная деятельность на острове отсутствует.

Геология острова Кильдин

Геологические образования острова Кильдин относятся к Тимано-Варангерской системе байкалитид и представляют собой моноклинально залегающие метаморфизованные осадочные комплексы, датированные средним, поздним рифеем и вендом. Возраст пород был определен калий-аргоновым методом по глаукониту из песчаника, и составляет 1059–762 млн лет (Беккер, 1970). Осадочные комплексы были тектонически подняты и частично надвинуты на архейские и раннепротерозойские породы Балтийского щита и Русской плиты. Поверхность моноклинали погружается в сторону Южно-Баренцевоморской впадины под углом 2–10° (Симонов и др., 1998).

На большей части о-ва Кильдин коренные породы не перекрыты слоями четвертичных отложений и выходят на дневную поверхность. Однако в южной части острова расположена массивная конечно-моренная гряда, простирающаяся с юго-запада на юго-восток (Атлас..., 1971).

Кильдинский литотип представлен песчаниками (30 %), аргиллитами (19 %) и алевролитами (24 %). В его составе также определяется сульфидная минерализация, представленная пиритом, халькопиритом и лимонитом (1.5–7.8 %). Фация метаморфизма здесь представлена глубинным метагенезом, в частности, серицит-хлоритовой ассоциацией. Среди пород развиты известняки и доломиты, наряду с субграувакками, граувакками и аркозами с первично-гидрослюдистым цементом. Наличие этих формаций указывает на высокий темп накопления терригенного материала. Также для о-ва Кильдин характерны гематитсодержащие алевропелиты и карбонатные породы (Любцов, Предовский, 1981).

Согласно мнению авторов первоисточника, работающих в рамках Тематической комплексной экспедиции СЗТГУ, исследуемые породы демонстрируют геохимическую специализацию (ассоциацию), включающую элементы Р, Мо, Pb и Cu, в то время как рудопроявления преимущественно характеризуются наличием Zr и Cu (Негруца и др., 1981). В настоящее время промышленная значимость выявленных рудопроявлений остается неопределенной.

Осадочные комплексы среднего рифея представлены сероцветными полимиктовыми конглобрекциями, конгломератами и гравелитами, с прослоями алевролитов и песчаников. В верхних слоях характерны карбонатные линзы и конкреции. Для углеродистых сланцев рифея характерно наличие Cu, Pb и P (Коноплева, 1977). Преобладающими минералами в сланцах о. Кильдин являются серицит или мусковит, хлорит и кварц, изредка встречаются прослои обогащенные эпидотом, цоизитом и хлоритоидом. Сульфиды формируют рассеянную вкрапленность или образуют конкреции и линзовидные прожилки (Негруца и др., 1981).

Позднерифейские и вендские образования включают разноцветные кварцевые, олигомиктовые и аркозовые песчаники, алевролиты, пелиты и доломиты. В разрезе встречаются полимиктовые конглобрекции с фосфоритовыми обломками и карбонатными стяжениями, указывающими на начальный метаморфизм (Чикирев, 1995).

Наличие фосфоритов и карбонатных стяжений свидетельствует о существовании эпиконтинентальных морских условий и зоне апвеллинга. Ограниченные концентрации фосфоритов в верхних слоях разреза указывают на начальные этапы их формирования, а также на положение континентальной плиты в умеренной климатической зоне. Карбонатные стяжения формировались в мелководье и в условиях умеренного, субтропического или аридного климата. Практически полное от-

сутствие наложенных процессов магматизма, метаморфизма и складчатости свидетельствует об отсутствии признаков активной окраины континента в данной области (Сорохтин и др., 2011).

Озеро Могильное

На о-ве Кильдин находится реликтовое озеро Могильное, образованное приблизительно 1000 лет назад за счет отрицательного движения береговой линии. Площадь озера 0.107 км², объем воды – 793 800 м³, максимальная длина – 562 м, ширина – 275 м, глубина – 16.3 м (Реликтовое..., 1975). Средний уровень воды в озере превышает уровень в Кильдинском проливе на 30–45 см. Озеро отделено от Кильдинского пролива естественной перемычкой со средней шириной 70 м (Реликтовое..., 1975). Перемычка сложена валунно-галечными морскими отложениями со средним коэффициентом фильтрации 520 м/сут, что позволяет просачиваться морской воде в озеро и быть причиной многослойности. Существуют несколько гипотез формирования перемычки оз. Могильное. Первая гипотеза выдвинута В. Д. Дибнером (Дерюгин, 1925), согласно которой перемычка представляет собой морскую косу, т. е. морской генезис перемычки с постепенным отделением озера от моря. Вторая гипотеза выдвинута Г. А. Тарасовым (Реликтовое..., 1975) и объясняет ледниковый генезис перемычки. Третья гипотеза выдвинута М. В. Митяевым с коллегами (2008) – перемычка сформировалась в подводных условиях, а ее замыкание происходило, когда она развивалась как морская коса. Озерная котловина образовалась в результате проседания отложений террасовых уровней, произошедшего на рубеже суббореальной и субатлантической климатических стадий голоцена. Установлена средняя скорость поднятия Восточного Кильдина (Митяев и др., 2008) за голоцен 13–15 мм/год с постепенным замедлением от раннего голоцена к настоящему времени.

Оз. Могильное представляет большой лимнологический интерес. В нем наблюдается плотностная стратификация с высокими значениями градиента плотности. Экзогенное меромиктическое озеро связано с Баренцевым морем с помощью фильтрации воды через тело перемычки. Озеро рассматривается как водоем морского типа, в котором происходит восстановление сульфатов до сероводорода (Реликтовое..., 1975). Это роднит оз. Могильное с Черным морем и его можно рассматривать как миниатюрную модель этого моря. Озеро примечательно наличием нескольких слоев воды разной степени солености, от почти пресной на поверхности (соленость не более 3 ‰) до солености более 30 ‰ у самого дна, характеризующегося наличием анаэробного сероводородного слоя, мощность которого увеличивается в последние десятилетия (рис. 2). Мощность опресненного слоя

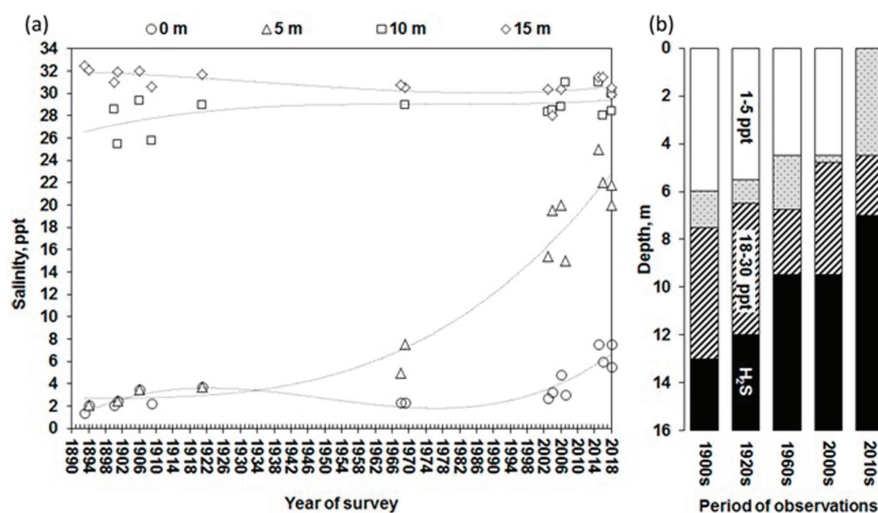


Рис. 2. Динамика стратификации озера Могильное за последнее столетие (Strelkov et al., 2019): а – изменение солености (в ‰ или ppt) в слоях воды 0, 5, 10, 15 м; б – изменение глубины слоев 1–5 ‰, 5–18 ‰, 18–30 ‰ и сероводородного слоя

Fig. 2. Dynamics of Lake Mogilnoye stratification over the last century (Strelkov et al., 2019): а – change in salinity (in ‰ or ppt) in water layers of 0, 5, 10, 15 m; б – change in the depth of layers 1–5 ‰, 5–18 ‰, 18–30 ‰ and the hydrogen sulfide layer

уменьшается, и в последние десятилетия соленость его повышается, а глубина расположения гало-клина становится все меньше (Krasnova et al., 2019; Strelkov et al., 2019).

По результатам исследований сотрудников ММБИ КНЦ РАН (Реликтовое..., 1975) в 1970-х гг. водная толща озера Могильное была разбита на три слоя: верхний слой (миксолимнион) с минерализацией 3.1 ± 1.6 г/л в толще воды 0–5 м, средний слой (хемоклин с максимальным значением вертикального градиента минерализации) с минерализацией 14 ± 10 г/л в толще воды 5–9 м, и нижний слой с минерализацией 28 ± 6 г/л в толще воды глубже 9 м.

В оз. Могильное проводились многочисленные, главным образом, гидробиологические исследования, потому что флора и фауна отличается от морской и пресноводной (Дерюгин, 1925; Реликтовое..., 1975, 2004; Широкова, 2004; Strelkov et al., 2014; Zhivotovsky et al., 2016; Горленко и др., 2024). Особый интерес представляет обитающий в озере уникальный озерный подвид атлантической трески, встречающийся только в этом водоеме – кильдинская треска *Gadus morhua kildinensis* Derjugin – включен в Красную книгу Российской Федерации с присвоением категории 1 («находящиеся под угрозой исчезновения») (Остров..., 2025). По сравнению с морской кильдинская треска имеет более длинный и узкий хвостовой стебель, более крупную и широкую голову, более крупные глаза, яркий и своеобразный окрас (Дерюгин, 1925; Zhivotovsky et al., 2016; Stroganov et al., 2023).

Материалы и методы

Проведены исследования микроэлементного состава 12 водных объектов поверхностных вод – в 8 озерах, включая реликтовое озеро Могильное, и 4 ручьях (рис. 1, табл. 1). Пробы воды отбирались с берега водных объектов с их поверхности вследствие отсутствия лодки в пластиковые бутылочки объемом 100 мл и хранились при температуре 4°C до проведения анализа. Микроэлементный состав определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре ELAN-9000 (PerkinElmer, США) согласно ГОСТ Р 56219-2014 (ИСО 17294-2:2003) «Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой». Проводилось определение более 40 микроэлементов, включая тяжелые металлы и редкоземельные элементы (РЗЭ). Содержание микроэлементов в поверхностных водах острова Кильдин и сопоставление их с содержанием в озерах северо-запада Мурманской области (Моисеенко и др., 2020) и в озере Большой Вудъявр (Даувадьтер и др., 2022) приведены в табл. 2.

Таблица 1. Станции отбора проб поверхностных вод на острове Кильдин

Table 1. Surface water sampling stations on Island Kildin

№№	Водный объект	Координаты	
		N	E
1	озеро Мелкое	69°20'19"	34°17'47"
2	ручей из оз. Придорожное	69°20'48"	34°17'46"
3	озеро Придорожное	69°20'50"	34°17'23"
4	озеро Наковальня	69°21'23"	34°13'13"
5	ручей из оз. Наковальня	69°21'20"	34°12'42"
6	озеро Сопки	69°21'21"	34°12'32"
7	озеро Последнее	69°21'43"	34°11'35"
8	озеро Второе	69°21'47"	34°11'43"
9	озеро Первое	69°21'50"	34°11'60"
10	Северные ручьи	69°22'42"	34°09'49"
11	Черная речка	69°19'22"	34°16'31"
12	озеро Могильное	69°19'08"	34°20'50"

Результаты и обсуждение

Исследования микроэлементного состава поверхностных вод о-ва Кильдин сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН в 2024 г. были проведены впервые. До настоящего времени химический состав

Таблица 2. Медиана и вариабельность (min-max) содержания микроэлементов (мкг/л) в поверхностных водах острова Кильдин, медианные и вариабельность (min-max) содержания в озерах северо-запада Мурманской области (Моисеенко и др., 2020) и в озере Большой Вудъявр (Даувальтер и др., 2022)

Table 2. Median and variability (min-max) of trace element content (µg/l) in surface waters of Kildin Island, median and variability (min-max) of content in lakes in the northwest of the Murmansk region (Moiseenko et al., 2020) and in Lake Bolshoy Vudyavr (Dauvalter et al., 2022)

Элементы	Остров Кильдин	С-3 Мурманской обл.	Большой Вудъявр
Ni	0.64 (0.14-2.44)	0.9 (<0.2-5.5)	3.65
Cu	0.68 (0.15-1.30)	0.7 (0.2-2.9)	11.8
Cr	0.82 (0.50-3.43)	0.20 (<0.1-0.5)	0.36
Sr	6.01 (3.88-1120)	11 (4-23)	123
Zn	1.91 (0.30-5.59)	0.9 (0.2-4.7)	4.60
Pb	0.071 (0.003-0.183)	0.1 (<0.1-0.6)	0.028
Mn	0.89 (0.06-4.76)	1.6 (0.2-18)	0.44
Cd	0.008 (0.002-0.014)	0.09 (<0.05-0.21)	0.020
Co	0.070 (0.006-0.128)	0.20 (<0.2-0.3)	0.036
Li	0.64 (0.27-31.7)	0.18 (0.11-0.65)	0.64
La	0.025 (0.001-0.106)	0.24 (0.07-0.62)	0.008
Ce	0.068 (0.0003-0.188)	0.29 (0.12-1.13)	0.009
Pr	0.0113 (0.0004-0.0265)	0.04 (0.01-0.07)	0.002
Nd	0.061 (0.002-0.139)	0.10 (0.04-0.21)	0.005
Y	0.059 (0.004-0.121)	0.07 (0.02-0.10)	0.004
Σ REE	0.316 (0.017-0.722)	0.92 (0.37-2.81)	0.031
Sc	0.20 (<0.003-0.24)	0.4 (<0.1-0.8)	1.86
Ba	2.42 (0.78-8.12)	—	3.49
Sb	0.019 (0.015-0.094)	0.04 (0.01-0.13)	0.483
Sn	0.0048 (0.0012-0.0102)	0.09 (0.04-0.32)	0.154
V	0.37 (0.14-9.59)	0.35 (<0.02-0.76)	1.72
Ti	0.26 (0.045-0.59)	1.79 (0.48-8.27)	0.88
Cs	0.0034 (0.0025-0.0661)	—	0.063
Bi	0.0008 (<0.0007-0.0123)	0.01 (<0.01-0.03)	0.046
Rb	0.53 (0.34-14.2)	0.63 (0.34-1.73)	8.13
U	0.006 (0.001-0.376)	0.03 (0.01-0.30)	0.237
Nb	0.0028 (0.0003-0.0355)	—	0.005
W	0.023 (0.004-0.101)	0.02 (<0.02-0.05)	0.68
Mo	0.031 (0.012-2.74)	0.14 (0.04-0.32)	9.23
Tl	0.0015 (<0.0001-0.0034)	—	0.055
Zr	0.074 (0.006-0.163)	0.05 (<0.02-0.15)	0.007
Hf	0.0025 (0.0004-0.0044)	—	—

воды был исследован только в оз. Могильное, и подробное его описание дано по результатам исследований сотрудников ММБИ КНЦ РАН, проведенные в 70-х гг. прошлого века (Реликтовое..., 1975). Вследствие проникновения морских вод в оз. Могильное через хорошо проницаемую перемычку, вода во всех слоях хлоридно-натриевого состава, на втором месте среди главных ионов сульфат-ион и магний. Вследствие наибольших размеров озера Могильное влияние морских аэрозолей должно сказываться на формировании химического состава всех водных объектов озера, поэтому можно предполагать, что поверхностные воды здесь должны быть хлоридно-натриевого состава, как это было отмечено в озерах прибрежной зоны северо-запада Мурманской области (Моисеенко и др., 2020). Но наличие карбонатных отложений и сульфидной минерализации в составе гор-

ных пород о-ва Кильдин может вносить свои коррективы в формирование главного ионного состава поверхностных вод острова. Например, известно, что вода подземного источника, впадающего в оз. Могильное и оказывающего опресняющее воздействие на поверхностный слой оз. Могильное, сульфатно-натриевого состава при минерализации 0.52 г/л (Реликтовое..., 1975), что не характерно для природных вод Мурманской области.

На микроэлементный состав оз. Могильное оказывает влияния просачивание морской воды, поэтому даже в опресненном поверхностном слое воды озера сохранялись особенности химического состава морской воды. Поэтому среди всех исследованных водных объектов о-ва Кильдин наибольшие содержания щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Rb, Sr, Cs и Ba), а также тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Sb, V, Ti, Bi, U, Nb, W, Mo) зафиксировано в оз. Могильное (рис. 3), и они выше, чем в озерах северо-западной части Мурманской области (Моисеенко и др., 2020), что, вероятно, связано с особенностями морской воды, химический состав которой характеризуется повышенным микроэлементным содержанием щелочных, щелочноземельных и тяжелых металлов. Содержание щелочных и щелочноземельных металлов в воде озера Могильное на 1–2 порядка выше, чем во всех других водных объектах, и также выше их концентраций в озере Большой Вудъявр Хибинского горного массива, в которое поступают стоки апатит-нефелинового производства из АО «Апатит» (табл. 2) (Даувальтер и др., 2022). Апатит-нефелиновые руды характеризуются повышенным содержанием всех щелочных и щелочноземельных металлов, а также редкоземельных элементов (РЗЭ) (Яковенчук и др., 1999), поэтому сточные воды АО «Апатит» также содержат повышенные концентрации вышеперечисленных элементов.

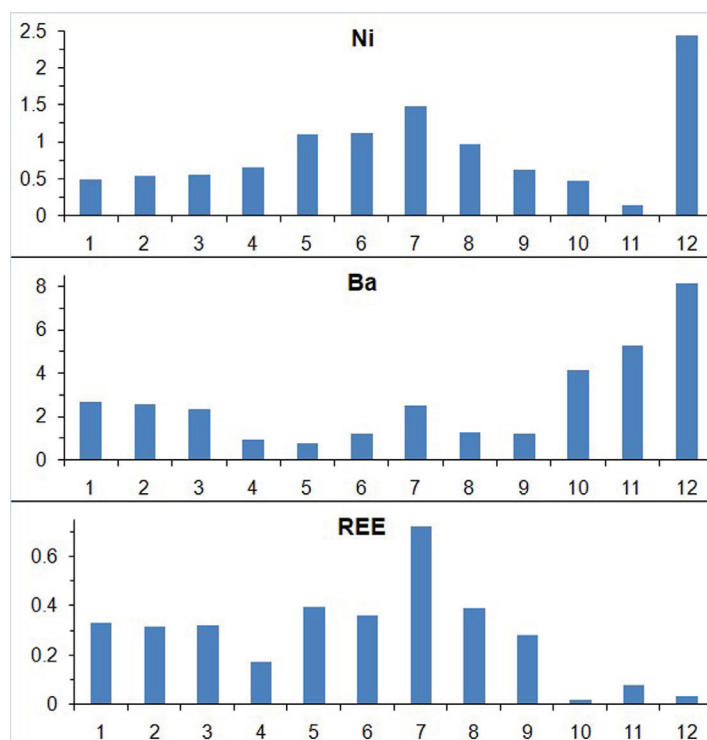


Рис. 3. Распределение микроэлементов (Ni, Ba, Σ REE) в водных объектах поверхностных вод острова Кильдин: 1 – оз. Мелкое; 2 –ручей из оз. Придорожное; 3 – оз. Придорожное; 4 – оз. Наковальня; 5 – ручей из оз. Наковальня; 6 – оз. Сопки; 7 – оз. Последнее; 8 – оз. Второе; 9 – оз. Первое; 10 – Северные ручьи; 11 – р. Черная; 12 – оз. Могильное

Fig. 3. Distribution of trace elements (Ni, Ba, Σ REE) in surface waters of Kildin Island: 1 – Lake Melkoe; 2 –Stream from Lake Pridorozhnoe; 3 – Lake Pridorozhnoe; 4 – Lake Nakovalnya; 5 – Stream from Lake Nakovalnya; 6 – Lake Sopki; 7 – Lake Posledny; 8 – Lake Vtoroe; 9 – Lake Pervoe; 10 –River Chernaya; 11–Lake Mogilnoye; 12 – Creek Severny

Содержание Li в воде оз. Могильное по результатам наших исследований равно 32 мкг/л, а по результатам исследований 1970-х гг. – 10 мкг/л в поверхностном слое, в придонном слое – 170 мкг/л (Реликтовое..., 1975), что сопоставимо со средним содержанием этого щелочного металла (180 мкг/л) в морской воде (Bowen, 1966). Содержание Sr, зафиксированное нами методом ИСП-МС, равно 1.12 мг/л, а в 1970-х гг. находилось в пределах от десятых долей мг/л в поверхностных слоях до 7 мг/л в придонных (Реликтовое..., 1975), что опять же сопоставимо со средним содержанием этого щелочного металла (8 мг/л) в морской воде (Bowen, 1966). Содержание V и Nb в поверхностном слое воды оз. Могильное согласно результатам наших исследований 2024 г. больше их среднего содержания в морской воде (табл. 3), а содержания W сопоставимы (Bowen, 1966), а концентрации других микроэлементов меньше в оз. Могильное.

Во всех остальных исследуемых водных объектах о-ва Кильдин концентрации подавляющего большинства микроэлементов меньше медианных значений для малых озер северо-западной части Мурманской области, находящихся под влиянием поступления морских аэрозолей и атмосферных выбросов медно-никелевого комбината «Печенганикель» (табл. 2) (Моисеенко и др., 2020).

Таблица 3. Содержание микроэлементов в поверхностном слое воды оз. Могильное (наши исследования 2024 г.) и их среднее содержание в морской воде (Bowen, 1966)

Table 3. The content of trace elements in the surface water layer of Lake Mogilnoye (our research in 2024) and their average content in sea water (Bowen, 1966)

Элемент	2024 г.	Bowen, 1966
Li	32	180
Rb	14	120
Sr	1120	8000
Cs	0.0661	0.5
Ba	8.12	30
Ni	2.44	5.4
Cu	1.25	3
Co	0.128	0.27
Sb	0.094	0.5
V	9.59	1
Ti	0.59	1
Bi	0.0123	0.2
U	0.376	2
Nb	0.0355	0.01
W	0.1007	0.1
Mo	2.74	10

Наибольшие содержания всех РЗЭ, а также Cd, Zr и Hf, обнаружены в воде озера Последнее (рис. 3), что, вероятно, связано с особенностями геохимического состава слагающих водосбор этого озера горных пород. Эти максимальные содержания также выше концентраций РЗЭ и других вышеперечисленных элементов в озере Большой Вудъявр. Высокое содержание РЗЭ, а также сопутствующих им Zr и Hf, связано, скорее всего, с наличием выходящих на поверхность острова фосфоритов (Чикирев, 1995). В воде озера Последнее фиксируются также высокие содержания тяжелых металлов, что связано с упомянутыми выше геохимической ассоциацией P, Mo, Pb и Cu и рудопроявлениями Zr и Cu (Негруца и др., 1981).

Для выявления связей между содержаниями микроэлементов в поверхностных водах о-ва Кильдин был использован корреляционный анализ (табл. 4) и факторный анализ методом главных компонент (рис. 4), традиционно применяемые для интерпретации результатов гидрохимических исследований (Даувальтер и др., 2022, 2023, 2024). По результатам корреляционного и факторного анализа выявлено две группы микроэлементов и два значимых фактора, объясняющих 65 % общей дисперсии. Первая группа микроэлементов объединяет РЗЭ, Zr и Hf и основную часть тяжелых металлов (Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni и др.). Это первый фактор в факторной модели (рис. 4), и он объясняется влиянием особенностей геохимического состава коренных горных пород, т. е. отмеченные ранее сульфидная минерализация, геохимическая специализация фосфоритов, включаю-

щая Р, РЗЭ, Zr, Pb, Cu и другие тяжелые металлы в составе сульфидов. Влияние морских аэрозолей и морских вод, поступающих в оз. Могильное сказалось в формировании второй группы микроэлементов – это объединение щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Rb, Sr, Cs и Ba) и сопутствующие им V, Mo, Nb, W (рис. 4).

Таблица 4. Значения коэффициента корреляции между содержаниями микроэлементов в водных объектах острова Кильдин. Отмечены значения коэффициента корреляции выше критических ($r=0.71$ при $n=12$ и $\alpha=0.01$)

Table 4. Values of the correlation coefficient between the contents of microelements in water bodies of Kildin Island. The values the of correlation coefficients above critical are noted ($r=0.71$ at $n=12$ and $\alpha=0.01$)

	Ni	Sr	Co	Li	REE	Ba	Sb	V	Cs	Rb	U	Nb	W	Mo	Zr	Hf
Ni	1.00															
Sr	0.80	1.00														
Co	0.87	0.66	1.00													
Li	0.80	1.00	0.67	1.00												
REE	0.14	-0.42	0.09	-0.40	1.00											
Ba	0.41	0.79	0.33	0.79	-0.57	1.00										
Sb	0.81	0.90	0.75	0.90	-0.34	0.53	1.00									
V	0.81	1.00	0.66	1.00	-0.41	0.78	0.89	1.00								
Cs	0.79	1.00	0.65	1.00	-0.43	0.80	0.89	1.00	1.00							
Rb	0.81	1.00	0.67	1.00	-0.41	0.78	0.90	1.00	1.00	1.00						
U	0.81	1.00	0.67	1.00	-0.38	0.78	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00					
Nb	0.66	0.93	0.50	0.93	-0.45	0.82	0.77	0.93	0.93	0.93	0.93	1.00				
W	0.33	0.67	0.13	0.67	-0.40	0.66	0.46	0.67	0.67	0.67	0.67	0.87	1.00			
Mo	0.80	1.00	0.66	1.00	-0.41	0.79	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.68	1.00		
Zr	0.17	-0.42	0.18	-0.41	0.93	-0.69	-0.24	-0.41	-0.44	-0.41	-0.39	-0.53	-0.52	-0.42	1.00	
Hf	0.43	-0.12	0.39	-0.11	0.85	-0.50	0.08	-0.11	-0.13	-0.11	-0.09	-0.24	-0.36	-0.11	0.86	1.00

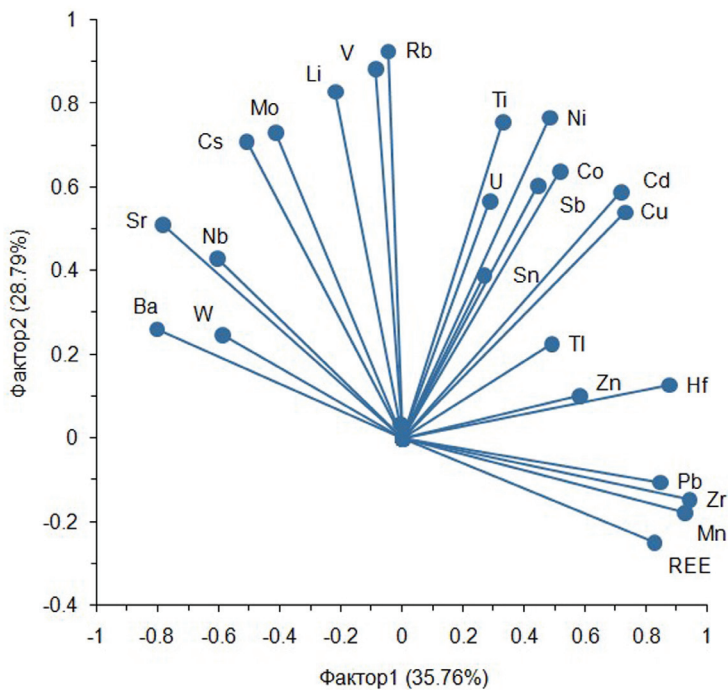


Рис. 4. Факторный анализ методом главных компонент микроэлементного состава водных объектов острова Кильдин
Fig. 4. Factor analysis using the principal component method of the trace element composition of water objects on Island Kildin

Заключение

На формирование микроэлементного состава поверхностных вод острова Кильдин влияют морские аэрозоли, геохимические особенности горных пород на водосборах, и возможно незначительное антропогенное влияние атмосферных выбросов промышленных и энергетических предприятий, автотранспорта и портов г. Мурманска, расположенного в 60 км на юго-запад от острова по направлению преобладающих ветров с материка.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ИППЭС КНЦ РАН за выполнение химических анализов.

Работа выполнена в рамках темы гранта РНФ 24-17-20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира».

Литература

1. Атлас Мурманской области / А. Ф. Антонов [и др.]. М.: Главное Управление Геодезии и Картографии при Совете Министров СССР, 1971. 33 с.
2. Беккер Ю. Р., Негруца В. З., Полевая Н. И. Возраст глауконитовых горизонтов и верхней границы гипербора восточной части Балтийского щита // ДАН СССР. 1970. Т. 193, № 5. С. 1123–1126.
3. Горленко В. М., Лунина О. Н., Груздев Д. С., Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Беленкова В. В., Козяева В. В., Саввичев А. С. Современное представление о биоразнообразии аноксигенных фототрофных бактерий в реликтовом озере Могильное (остров Кильдин, Мурманская область) // Микробиология. 2024. Т. 93, № 3. С. 267–277. <https://doi.org/10.31857/S0026365624030021>.
4. Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Слуковский З. И. Влияние стоков апатит-нефелинового производства на биогеохимические процессы в арктическом горном озере // Геохимия. 2022. Т. 67, № 10. С. 1013–1028. <https://doi.org/10.31857/S0016752522090023>.
5. Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Даувальтер М. В., Слуковский З. И. Эколого-геохимическая оценка снежного покрова в районе воздействия апатит-нефелинового производства Кольского полуострова // Геохимия. 2023. Т. 68, № 12. С. 1312–1328. <https://doi.org/10.31857/S0016752523120026>.
6. Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Даувальтер М. В., Слуковский З. И. Геохимическая модификация поверхностных вод Арктического горного массива с начала деятельности нового горнодобывающего предприятия // Геохимия. 2024. Т. 69, № 5. С. 477–494. <https://doi.org/10.31857/S0016752524050057>.
7. Дерюгин К. М. Реликтовое озеро Могильное (остров Кильдин в Баренцевом море) // Тр. ПЕНИ. 1925. № 2. 112 с.
8. Коноплева Н. Г. О стратиграфии рифейских отложений полуострова Рыбачий // Новые данные по геологии и стратиграфии Северо-Запада РСФСР: тр. Мин-ва геологии РСФСР. М., 1977. Вып. 6. С. 62–80.
9. Любцов В. В., Предовский А. А. Закономерности распределения органического вещества и углеводородных газов в осадочных толщах верхнего рифея и венда Кольского полуострова // Проблемы осадочной геологии докембрия: сборник Академии наук СССР. М.: Наука, 1981. Вып. 7. С. 181–187.
10. Митяев М. В., Корсун С. А., Стрелков П. П., Матишов Г. Г. Древние береговые линии восточного Кильдина // Доклады АН. 2008. Т. 423, № 4. С. 546–550.
11. 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. <https://doi.org/10.31857/S0016752520060084>.
12. Негруца В. З., Шурыгин В. Н., В. А. Журавлев. Докембрийские углеродсодержащие породы Восточной части Балтийского щита // Проблемы осадочной геологии докембрия: сборник Академии наук СССР. М.: Наука, 1981. Вып. 7. С. 66–80.
13. Остров Кильдин <https://goarctic.ru/news/ostrov-kildin/> (дата обращения: 20.02.2025).
14. Реликтовое озеро Могильное. Л. Изд-во: Наука, 1975. 298 с.
15. Реликтовое озеро Могильное – 2023. СПб. Изд-во: СПбГУ, 2024. 20 с.
16. Симонов А. П., Губерман Д. М., Яковлев Ю. Н., Снетко П. П., Митрофанов Ф. П., Любцов В. В., Предовский А. А., Припачкин В. А. Рифейская нефть полуострова Рыбачий: миф или ключ к принципиально новому направлению нефтегазопроисловых работ на шельфе Баренцева моря? // Вестник МГТУ. 1998. Т. 1, № 2. С. 121–140.

17. Сорохтин Н. О., Козлов Н. Е., Куликов Н. В., Глазнев В. Н., Чикирев И. В. Эволюция северо-западной части Тимано-Варангерского нефтегазоносного бассейна // Вестник КНЦ РАН. 2011. № 3. С. 4–21.
18. Чикирев И. В. Верхнедокембрийские фосфоритсодержащие отложения Кольского полуострова: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 1995. 18 с.
19. Широкова В. А. Карл Шмидт и загадка озера Могильного (гидробиологический аспект) // Современная биогеография: Материалы Второй всероссийской научной телеконференции. М. Изд-во: Ставропольский государственный университет. 2004. С. 24–29.
20. Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П. Минералы Хибинского массива. М. Изд-во: Земля, 1999. 326 с.
21. Bowen H. J. M. Trace Elements in Biochemistry. London: Academic Press, 1966. 241 p.
22. Krasnova E. D., Efimov V. A., Fedyuk M. L., Frolova N. L., Kokryatskaya N. M., Kossenkov A. V., Patsaeva S. V., Vasilenko A. N., Voronov D. A., Strelkov P. P. New data on Lake Mogilnoe (Kildin Island, Barents Sea): the results of the 2018 expeditions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 263. 012019 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/263/1/012019>.
23. Strelkov P., Shunatova N., Fokin M., Usov N., Malavenda S., Fedyuk M., Lubina O., A. Poloskin, Korsun S. Marine Lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea): one hundred years of solitude // Polar Biology. 2014. V. 37. P. 297–310. <https://doi.org/10.1007/s00300-013-1431-4>.
24. Strelkov P., Stogov I., Krasnova E., Movchan E., Polyakova N., Goldin S., Ivanov M., Ivanova T., Malavenda S., Fedyuk M., Shunatova N. Rapid unpredicted changes in the stratification of marine lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea) through the early 21st century // Polar Research. 2019. V. 38. 3394. <http://dx.doi.org/10.33265/polar.v38.3394>.
25. Stroganov A. N., Strelkov P. P., Mukhina N. V., Stogov I. A. Morphometric Characters and Feeding Habits in the Early Ontogenesis of Kildin Cod *Gadus morhua kildinensis* (Gadidae) from Lake Mogilnoe (Kildin Island, Barents Sea) // Journal of Ichthyology. 2023. V. 63, No. 2. P. 301–308. DOI: 10.1134/S0032945223020200.
26. Zhivotovsky L. A., Teterina A. A., Mukhina N. V., Stroganov A. N., Rubtsova G. A., Afanasiev K. I. Effects of genetic drift in a small population of Atlantic cod (*Gadus morhua kildinensis* Derjugin) landlocked in a meromictic lake: genetic variation and conservation measures // Conservation Genetics. 2016. V. 17. P. 229–238 <https://doi.org/10.1007/s10592-015-0774-5>.