

Химический состав поверхностных вод в зоне влияния Горно-обогатительного комбината «Олений Ручей»

Даувальтер В. А.¹, Денисов Д. Б.¹, Даувальтер М. В.², Сандимиров С. С.¹, Слуковский З. И.¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, v.dauvalter@ksc.ru

² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, dauvalter@geoksc.apatity.ru

Аннотация. В статье приводится описание химического состава поверхностных вод, подверженных влиянию деятельности горнорудного комбината. За десятилетнюю историю разработки апатит-нефелинового месторождения «Олений ручей» на порядок произошло увеличение минерализации воды, содержания соединений биогенных элементов, органического вещества и ряда микроэлементов (Al, Fe, Sr, Mo, F, Cu, Mn, Zn и Cr), изменилось соотношение главных ионов в озерах и ручьях, загрязняемых сточными водами карьера и подземного рудника. В воде оз. Комариное, в которое поступают воды из хвостохранилища, на два порядка увеличилось содержание соединений азотной группы, и нитрат-ион входит в состав главных ионов. Установлено, что снижение качества поверхностных вод имеют локальный характер и характерно для водных объектов, принимающих сточные воды горнорудного предприятия.

Ключевые слова: Арктика, Хибины, антропогенная нагрузка, поверхностные воды, качество вод, апатит-нефелиновое производство.

Chemical composition of surface waters in the influence zone of the Mining and Processing Enterprise «Oleniy Ruchey»

Dauvalter V. A.¹, Denisov D. B.¹, Dauvalter M. V.², Sandimirov S. S.¹, Slukovskii Z. I.¹

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems Kola SC RAS, Apatity, v.dauvalter@ksc.ru

² Geological Institute Kola SC RAS, Apatity, dauvalter@geoksc.apatity.ru

Abstract. The article provides a description of the chemical composition of surface waters affected by the activities of a mining plant. Over the ten-year history of the development of the Oleniy Ruchey apatite-nepheline deposit, water mineralization increases in an order of magnitude, contents of nutrients, organic matter and a number of trace elements (Al, Fe, Sr, Mo, F, Cu, Mn, Zn and Cr), the ratio of the main ions has changed in lakes and streams polluted by quarry and underground mine wastewater. In the water of Lake Komarinoe, which receives water from the tailings pond, the content of nitrogen group compounds has increased by two orders of magnitude, and the nitrate ion is included in the main ions composition. It has been established that the decrease in the quality of surface waters is local in nature and is typical for water bodies receiving wastewater from a mining enterprise.

Keywords: Arctic, Khibiny Mountains, anthropogenic load, surface waters, water quality, apatite-nepheline production.

Введение

Проблема ухудшения состояния природных вод в результате техногенного воздействия горнодобывающих предприятий на протяжении последних десятилетий является одной из актуальных в области охраны окружающей среды (Мироненко и др., 1988; Merrington and Alloway, 1994; Jung, 2001; Lee et al., 2001; Кашулин и др., 2019). Изменения химического состава поверхностных вод происходят вследствие поступления загрязняющих веществ из поверхностных техногенных накопителей (хвостохранилищ, прудов-отстойников, массивов отвальных вскрышных и некондиционных пород и т. п.), загрязненных почв, нарушения гидродинамического и гидрохимического режима поверхностных и подземных вод (Кашулин и др., 2008; Легостаева и др., 2023; Пашкевич и др., 2023; Семячков и др., 2023). Загрязнение поверхностных вод в результате аварий на горнодобывающих предприятиях, например, прорыв дамб хвостохранилищ, может в течение длительного времени оказывать негативное влияние на водные экосистемы (Islam, Murakami, 2021; Pacheco et al., 2023). В отработанных горных пространствах происходят процессы, увеличивающие минерализацию и изменяющие химический состав шахтных вод. Рудничные стоки выносят на поверхность сое-

динения, являющиеся источниками загрязнения природных вод. Например, поверхностные и подземные воды в районе Cu–Au–Mo месторождения Казино (Канада) аномальны по содержанию Cd (до 5.4 мкг/л), Co (до 64 мкг/л), Cu (до 1657 мкг/л), Mo (до 25 мкг/л), As (до 17 мкг/л), Re (до 0.7 мкг/л) и Zn (до 354 мкг/л) (Kidder et al., 2022). В шахтных водах установлено также наличие микропластика, который загрязняет воду на глубине более 700 м от поверхности, и микропластиком загрязнены все источники подземных вод в Моравско-Силезском горнодобывающем районе (Чехия), как неглубокие грунтовые, так и глубокие артезианские воды, включая шахтные воды (Brožová et al., 2023).

Данная статья продолжает представление результатов исследования химического состава природных вод в зоне влияния деятельности горно-обогатительного комбината (ГОК) «Олений ручей» (Dauvalter et al., 2020; Даувальтер, Даувальтер, 2020; Даувальтер и др., 2021, 2022 а, 2023). Целью данных исследований является оценка степени воздействия нового горнорудного предприятия на поверхностные воды.

Материалы и методы

Подробное описание геологического строения и истории освоения апатит-нефелиновых месторождений Хибинского щелочного массива приводится в ранее опубликованных работах (Ферсман, 1968; Яковенчук и др., 1999; Барабанов и др., 1999; Даувальтер и др., 2022 б, 2023; Dauvalter et al., 2022).

Пробы поверхностных вод из водных объектов отбирались сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН в различные сезоны 2021 г.: во время весеннего половодья, летом, осенью, в начале холодного периода. Местоположение станций отбора поверхностных вод представлено на рис. 1, а их координаты и высоты отображены в таблице 1. Также химический состав воды оз. Комариное исследовался в течение последних 13 лет с 2011 по 2023 гг. Пробы озерных вод отбирались сотрудниками АО «СЗФК» 4 раза в год – в конце зимы, в половодье, в летнюю межень, в начале зимнего периода.

Таблица 1. Станции отбора проб поверхностных вод в районе деятельности ГОК «Олений ручей». Номера станций соответствуют номерам, указанным в табл. 2–4 и рис. 1–2

Table 1. Surface water sampling stations in the area of operation of the Mining and Processing Enterprise «Oleniy Ruchey». The station numbers correspond to the numbers indicated in the Tables 2–4 and Figures 1–2

№№	Водный объект	Долгота	Широта	Высота, м
1	р. Тульйок	67°44'58.3"	34°10'57.6"	151
2	руч. Теплый	67°42'52.4"	34°16'58.5"	154
3	руч. Нагорный	67°41'13.3"	34°15'23.0"	209
4	руч. Олений ручей (верховье)	67°41'53.1"	34°10'08.9"	503
5	руч. Олений ручей (низовье)	67°40'36.0"	34°13'54.4"	221
6	руч. Минеральный (исток)	67°41'11.3"	34°09'19.5"	522
7	руч. Минеральный (сброс в карьер)	67°40'50.3"	34°10'08.1"	449
8	оз. Комариное	67°40'48.8"	34°16'15.4"	176
9	р. Вуоннейок	67°37'10.6"	34°10'37.7"	178
10	вода из карьера ГОК «Олений ручей»	67°40'56.9"	34°10'49.2"	396
11	ст. воды подз. рудника ГОК «Олений ручей»	67°40'36.9"	34°13'54.0"	230

Химический состав воды определяли в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН по единым методикам (Standard method..., 1999). Для лучшего представления полученного материала результаты химического анализа воды из каждого водного объекта усреднялись и представлены в таблицах и рисунках.

Результаты и обсуждение

Водные объекты исследуемой территории были разделены на две группы: 1) напрямую не затронутые деятельностью ГОК «Олений ручей», 2) загрязняемые стоками промышленных горнорудных объектов (рудничными сточными водами, водами из хвостохранилища и отвалов горных пород).

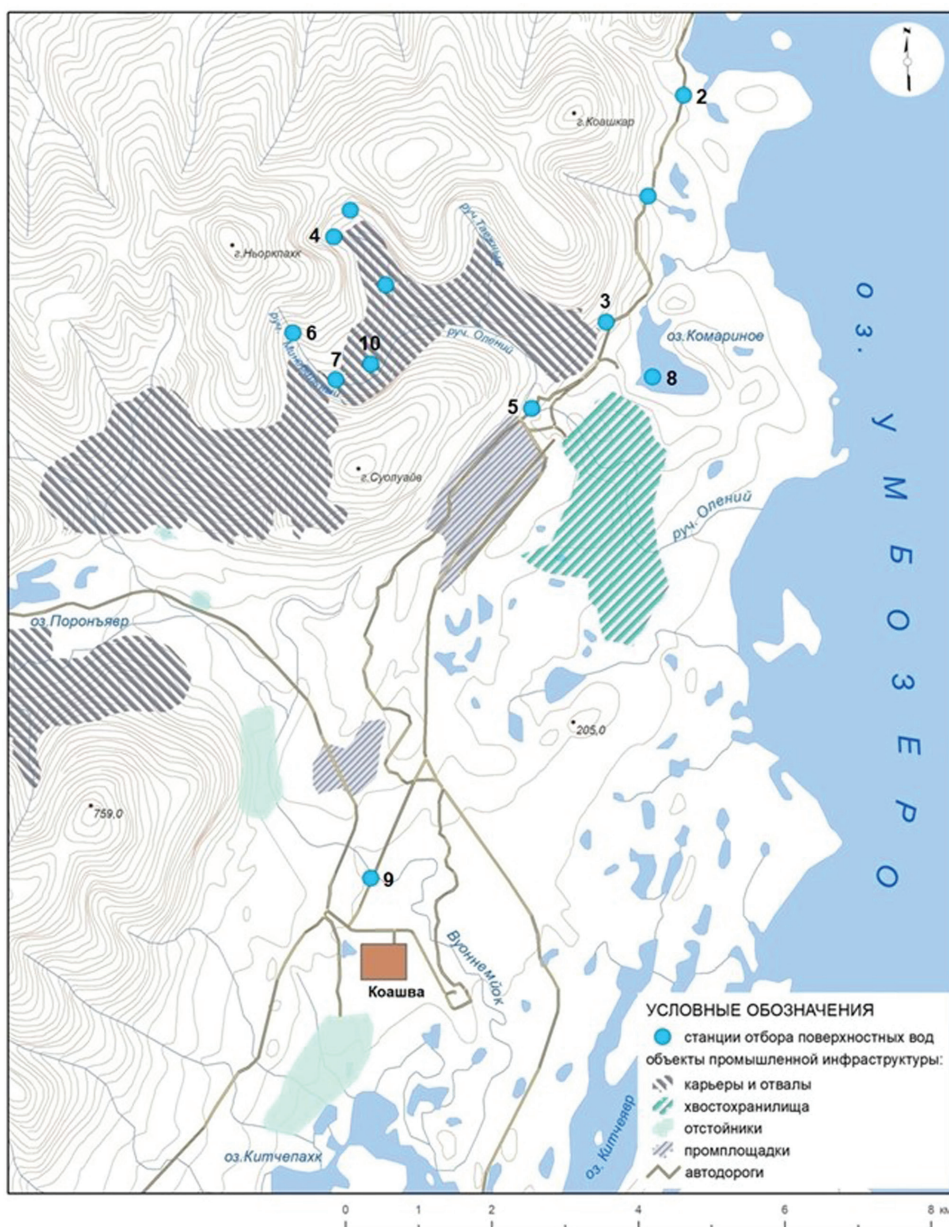


Рис. 1. Карта-схема расположения промплощадки ГОК «Олений Ручей» и станций отбора проб поверхностных вод. Номера станций соответствуют номерам, указанным на рисунке 2 и в таблицах 1–4.

Fig. 1. Schematic map of the location of the «Oleniy Ruchey» industrial site and surface water sampling stations. The station numbers correspond to the numbers given in Fig. 2 and Tables 1–4.

Среди водных объектов первой группы выделяются три, имеющие самые низкие значения минерализации (немногим более 10 мг/л) и pH (значения на границе между слабо кислыми и нейтральными по классификации О. А. Алекина, 1970) – руч. Нагорный и верховья ручьев Олений и Минеральный (табл. 2, рис. 2). Эти три водных объекта имеют снеговое питание, поэтому содержание главных ионов в них немногим отличается от снеговой воды, но в них значительно увеличивается содержание Na^+ и HCO_3^- по сравнению со снегом и воды этих объектов относятся к гидрокарбонатному классу, как и практически всех поверхностных вод Мурманской области, в то время как в снеге исследуемой территории превалирует анион Cl^- и средняя величина pH равна 5.72 (Даувальтер и др., 2023).

Другие два водных объекта, не подверженные прямому воздействию стоков ГОК «Олений Ручей» – р. Тульйок и руч. Теплый. Река Тульйок в низовьях течет по лесной территории,

а руч. Теплый, который значительно меньше по морфометрическим показателям, но представляет собой небольшую озерно-речную систему, вытекает из озера и в нижнем течении протекает по лесной и заболоченной территории. Поэтому величина pH, содержание главных ионов и минерализация в этих двух водотоках больше, чем в трех описанных выше ручьях, а также больше, чем в водах Хибинских малых горных озер и озерах восточной части Мурманской области (табл. 2, рис. 2). Река Тулуйок и руч. Теплый сохраняют гидрокарбонатный класс и натриевую группу и относительно незначительную величину минерализации в пределах соответственно от 21 до 37 мг/л и от 34 до 47 мг/л с минимальными значениями в период половодья (вследствие поступления большого количества низкоминерализованных снеговых вод) и максимальными в конце зимней межени.

Таблица 2. Средние значения pH, электропроводности (χ , мкСм/см), содержания основных ионов и суммы растворенных веществ ($\Sigma_{\text{ион}}$, мг/л) в воде исследованных водных объектов (мг/л)

Table 2. Average values of pH, electrical conductivity (χ , $\mu\text{S}/\text{cm}$), content of main ions and total dissolved substances ($\Sigma_{\text{ион}}$, mg/l) in the water of the studied water bodies (mg/l)

№№	pH	χ	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	$\Sigma_{\text{ион}}$
1	6.90	32	0.72	0.08	6.32	1.31	16.95	1.74	0.83	28.0
2	7.03	50	2.74	0.36	7.91	1.16	24.39	3.63	0.84	41.3
3	6.48	14	0.55	0.05	2.28	0.52	5.83	1.21	0.65	11.1
4	6.50	15	0.40	0.05	2.61	0.59	6.13	1.50	0.50	11.8
5	7.38	247	21.4	1.2	26.8	13.6	41.0	27.1	2.9	150.4
6	6.40	13	0.44	0.03	2.10	0.61	5.37	1.23	0.74	10.6
7	6.75	86	7.92	0.29	6.61	3.64	15.01	23.74	2.06	60.4
8	7.44	219	17.8	1.6	23.3	8.4	53.6	35.6	3.9	152.9
9	7.45	219	8.59	0.72	33.0	10.3	49.3	46.6	5.2	158.6
10	7.60	172	9.74	0.61	14.2	10.77	36.43	21.00	2.26	103.2
11	10.14	383	11.5	0.29	61.0	16.7	105.6	44.9	7.03	261.1

Несмотря на то, что расстояние по руслу руч. Минеральный от истока до места впадения его в карьер составляет только 1 км, происходят значительные изменения качества воды ручья. Вода ручья увеличивает свою минерализацию в 6 раз (табл. 2) и изменяет качество с гидрокарбонатного класса на сульфатный и с натриевой группы на кальциевую (рис. 2). Значительное загрязнение и изменение химического состава воды руч. Минеральный происходит вследствие того, что его русло проходит по техногенно нарушенной территории, где лежат отвалы горных пород (содержащие минералы с большим содержанием кальция и сульфидные минералы), проложены дороги, верхние слои горных пород нарушены деятельностью ГОК.

Рудничные сточные воды и загрязненные воды из хвостохранилища поступают в нижнее течение руч. Олений и в оз. Комариное, что сказывается в повышении содержания основных ионов (рис. 2), минерализации (табл. 2), величины pH (на 1 единицу pH по сравнению с верхним течением ручья Олений), содержания соединений азотной группы (табл. 3). Минерализация в этих водных объектах изменяется в пределах от 107 до 220 мг/л и от 89 до 184 мг/л соответственно, с минимальными значениями в период половодья с увеличением в зимний период. Примерно равное соотношение главных анионов $[\text{HCO}_3^{-}]$ и $[\text{SO}_4^{2-}]$ в воде нижнего течения Оленьего ручья и оз. Комариное (в среднем 1.3 и 1.2 соответственно) свидетельствует о поступлении сернистых соединений в водные объекты со стоками комбината, которые образуются в результате выветривания сульфидов (например, молибденит, пирит, халькопирит, сфалерит), присутствующих в составе горных пород Хибинского щелочного массива (Яковенчук и др., 1999) в процессе добычи и переработки апатит-нефелиновой руды. Вода оз. Комариное гидрокарбонатно-натриевая, т. е. сохраняется природное соотношение главных ионов, но Ca^{2+} практически вплотную приблизился к Na^{+} , а SO_4^{2-} к HCO_3^{-} (рис. 2), что говорит об обогащении воды озера продуктами растворения и выщелачивания минералов, входящих в состав горных пород разрабатываемого месторождения.

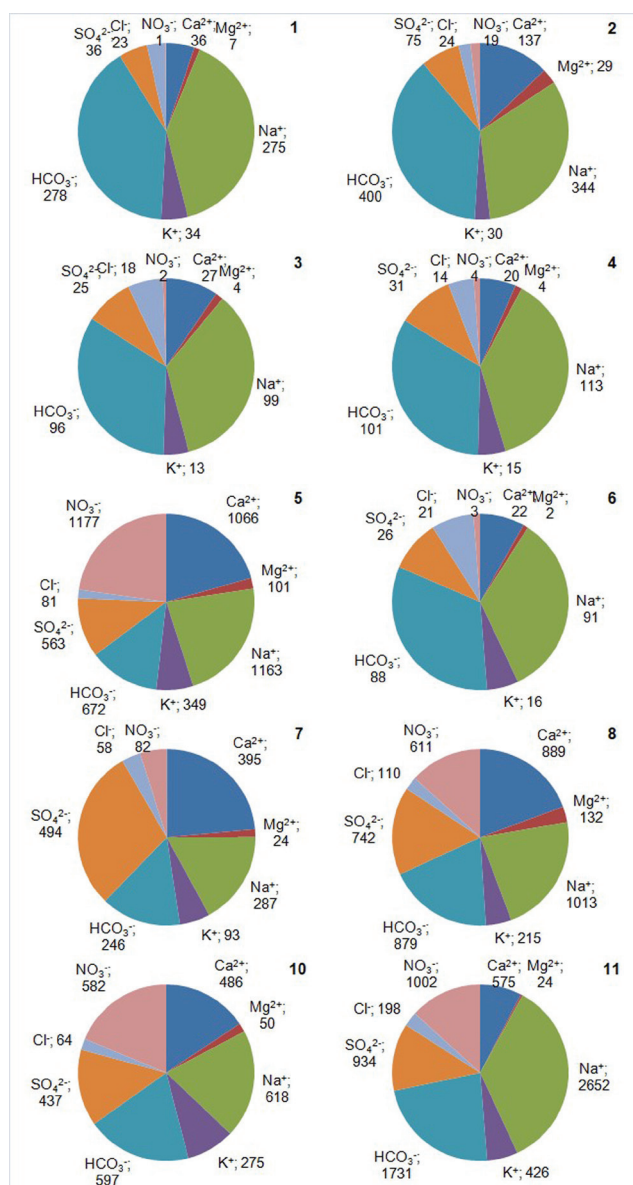


Рис. 2. Эквивалентные концентрации (мкг-экв/л) главных ионов в воде станций поверхностных вод ГОК «Олений ручей». Номера станций соответствуют номерам, указанным на рисунке 1 и в таблицах 1–4.

Fig. 2. Equivalent concentrations (μeq/l) of the main ions in the water of surface water stations of the Oleniy Ruchey mining and processing enterprise. The station numbers correspond to the numbers shown in Fig. 1 and in Tables 1–4.

карьера содержания HCO_3^- и NO_3^- практически равны, а содержание сульфат-иона тоже довольно высокое (рис. 2).

Содержания PO_4^{3-} и $\text{P}_{\text{общ}}$ и Si в воде стоков карьера и подземного рудника и нижнего течения Оленьего ручья значительно больше, чем в воде водоемов фоновой зоны (табл. 3), что объясняется поступлением соединений фосфора и кремния при выщелачивании соответственно апатита и силикатов (алюмосиликатов). В воде стоков подземного рудника показатели содержания органического вещества (ХПК_{Mn} и $\text{C}_{\text{орг}}$) в 1.5–2 раза выше, чем в воде других водоемов, за исключением р. Тульйок, где они немного меньше (табл. 3). Высокое содержание органического вещества в воде стоков подземного рудника может быть связано с поступлением органических веществ-реагентов, используемых при получении апатитового концентрата и состоящих в основном из органических веществ (Шаповалов и др., 2015).

Азотсодержащие взрывчатые вещества, используемые при добыче апатит-нефелиновых руд на ГОК «Олений ручей», значительно увеличивают содержание азотных соединений в воде нижнего течения ручья Олений и оз. Комариное. В результате исследований в 2021 г. установлено, что содержание NO_3^- увеличивается с 11.5 до 24 мг/л и с 5.5 до 10.8 мг/л соответственно с половодья до зимнего периода. В незагрязненных водотоках содержание нитрат-иона и других соединений азота сотые и десятые доли мг/л (табл. 3). Содержание нитрат-иона в воде нижнего течения Оленьего ручья столь высокое, что NO_3^- превышает HCO_3^- и становится главным анионом, а катион Ca^{2+} практически вплотную приблизился к Na^+ .

Стоки из карьера ГОК «Олений ручей» были отобраны из зумпфа, т. е. из самой нижней части карьера, отстойника для сбора поверхностных и подземных вод, поступающих в карьер, а из подземного рудника – из дополнительной горной выработки, выводящей сточные воды рудника на поверхность земли. В подземный рудник поступают подземные воды, время соприкосновения которых с горными породами и продуктами деятельности рудника (разрушенной горной массой, взрывчатыми веществами) дольше, чем в открытом карьере, куда поступают и поверхностные воды, в том числе талые снеговые и дождевые. Вследствие этого, минерализация сточных вод подземного рудника в 2.5 раза больше, чем сточных вод из карьера, а величина pH почти на 3 единицы pH больше, и сточные воды подземного рудника классифицируются как сильнощелочные (табл. 2). Сточные воды подземного рудника и карьера имеют гидрокарбонатно-натриевый состав, с большой долей нитрат-иона, который стоит на втором месте среди анионов, а в сточных водах

Таблица 3. Среднее содержание соединений N и P (мкг/л), цветность (Цветн., °Pt), химическое потребление кислорода (ХПК_{Mn}, мгО/л), общий органический углерод (C_{орг}, мгС/л) и Si (мг/л) в воде исследуемых водных объектов

Table 3. Average content of N and P compounds (μg/l), color (Color, °Pt), chemical oxygen demand (COD_{Mn}, mgO/l), total organic carbon (TOC, mgC/l) and Si (mg/l) in the water of the studied water bodies

№№	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{tot}	PO ₄ ³⁻	P _{tot}	Цветн.	ХПК _{Mn}	C _{орг}	Si
1	2	14	64	1	4	8	2.21	3.24	3.28
2	3	263	306	1	3	3	1.15	2.42	3.29
3	9	25.5	93	1	94	4	1.58	2.76	2.12
4	0	51	64.5	1	5	1	1.01	2.32	2.11
5	763	16480	17663	2	250	4	1.15	2.43	4.06
6	0	48	74	0	0	1	1.28	2.53	1.99
7	1	1150	1162	1	9	1	1.32	2.56	2.99
8	430	8565	9435	2	19	3	1.31	2.55	2.95
9	15	4866	4996	30	117	6	1.80	2.93	3.28
10	2508	8156	10900	3	374	3	1.34	2.57	3.19
11	4380	14030	19050	28	72	4	2.48	3.44	5.33

В составе нефелиновых сиенитов Хибинского горного массива обнаружено много минералов, содержащих Sr, например, лопарит, нордит. Sr также содержится в апатите, встречается разновидность фторапатита – стронциоапатит Sr₃Ca₂[PO₄]₃F, в котором содержание оксида стронция около 50 % (Яковенчук и др., 1999). Увеличение содержания Sr, превышающее величину ПДК_{рбхз} (0.4 мг/л), зафиксировано в воде оз. Комариное в последние годы (рис. 3), также как и в воде Оленьего ручья. В сезонном распределении Sr в воде оз. Комариное отмечается снижение содержания в половодье и увеличение в летнюю межень с 0.13 до 0.64 мг/л, в воде Оленьего ручья содержание Sr немного выше и находится в диапазоне 0.35–0.85 мг/л. Концентрации Sr закономерно высокие в воде р. Вуоннемйок и в сточных водах карьера и подземного рудника (табл. 4). В воде малых Хибинских озер зафиксировано повышенное содержание Sr (Дауваньтер и др., 2022 б) по сравнению с водой озер восточной части Мурманской области вследствие геохимических особенностей Хибинского массива.

При выветривании и выщелачивании главного рудного минерала месторождения Олений ручей фторапатита (Ca₅(PO₄)₃F) в природные воды поступает F в повышенных концентрациях. В воде оз. Комариное содержание F в последние годы превышает величину ПДК_{рбхз} 0.75 мг/л. В период 2016–2018 гг. происходило некоторое снижение содержания F в воде оз. Комариное, а затем в 2019–2022 гг. значительное увеличение F (рис. 3). Такие флуктуации концентраций F в воде озера происходят, вероятно, вследствие добычи апатит-нефелиновых руд из различных рудных горизонтов с разным содержанием F, например, из подземного рудника, начало деятельности которого совпадает со снижением содержания F. В пользу этого предположения говорит возрастание содержания ионов Cl⁻ в воде оз. Комариное в период 2016–2018 гг. (рис. 3). Скорее всего, в этот период возросла добыча апатит-нефелиновых руд с повышенным содержанием хлорапатита, а в период 2019–2021 гг. относительное содержание фторапатита в составе руд увеличилось, а хлорапатита уменьшилось.

Минералы Mo (молибденит MoS₂, молибдит MoO₃, вольфенит PbMoO₄) присутствуют в рудообразующих породах апатит-нефелиновых месторождений (пегматитах и мельтейгит-уртитях) Хибинского горного массива и распространены в Хибинском щелочном горном массиве достаточно широко (Яковенчук и др., 1999). Несмотря на значительный разброс значений концентраций Mo в воде оз. Комариное за период 2011–2023 гг., выявлено достоверное увеличение содержания этого токсичного тяжелого металла, особенно в последние два года наблюдений (рис. 3). Содержание Mo в воде озера в основном больше величины ПДК_{рбхз} (0.0012 мг/л). Известно, что в природных водах,

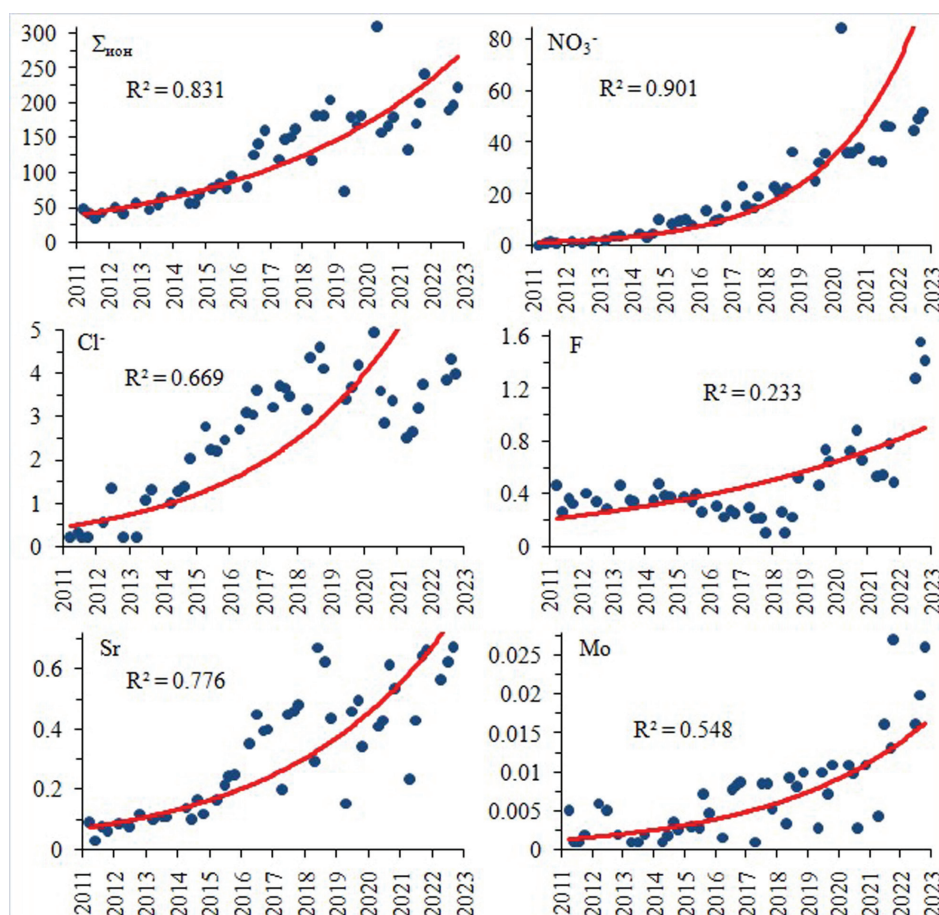


Рис. 3. Динамика минерализации ($\Sigma_{\text{ион}}$), содержания нитрат- и хлор-ионов, Sr и Mo (мг/л) в воде оз. Комариное за период 2011–2023 гг.

Fig. 3. Dynamics of mineralization ($\Sigma_{\text{ион}}$), content of nitrate and chlorine ions, Sr and Mo (mg/l) in water of Lake Komarinoye for the period 2011–2023

приуроченных к району разработки месторождения апатит-нефелиновых руд в районе Хибинского горного массива, обнаружено присутствие молибдена в количествах, значительно превышающих значения ПДК_{рбхз} (Сулименко и др., 2017). Большая часть этих вод поступает в оз. Большой Вудъявр, где концентрации Mo в 25 раз превышают нормативные показатели (Чукаева, Матвеева, 2018).

В воде Оленьего ручья и р. Вуоннемйок отмечаются превышения значения ПДК_{рбхз} Fe (0.1 мг/л) до 108 и 138 раз соответственно, а также Al (0.04 мг/л) до 15 и 20 раз соответственно (табл. 4). В оз. Комариное зафиксировано превышение ПДК_{рбхз} Al до 5 раз. Повышенное поступление Fe и Al в природные воды, подверженных влиянию стоков ГОК «Олений ручей», происходит вследствие выщелачивания многочисленных минералов, содержащих эти самые распространенные металлы в земной коре, в первую очередь главных рудных минералов: нефелин $(\text{Na,K})\text{AlSiO}_4$, эгирин $\text{NaFe}^{3+}(\text{Si}_2\text{O}_6)$, титаномагнетит Fe_2TiO_4 и многие другие. Высокое содержание Al и Fe отмечено в воде руч. Нагорный – до 7.2 и 1.2 мг/л соответственно. Этот ручей имеет очень низкую минерализацию и напрямую не затронут деятельностью ГОК «Олений ручей», он является временным водотоком, и вода в нем была отобрана только в период интенсивного снеготаяния и половодья, а позднее летом и осенью руч. Нагорный полностью исчезает. Ручей течет из-под отвалов горных пород и талой снеговой водой вымывает большое количество пыли и раздробленного мелкодисперсного материала, образовавшегося при проведении буровзрывных и погрузочно-разгрузочных работ при добыче руды и извлечении горных пород, а также в результате поступления продуктов выветривания, выщелачивания и растворения горных пород. Как было сказано выше, максимальные водоприток в горные выработки наблюдаются в период весеннего снеготаяния и ливневых дождей. Максимальное содержание Fe и Al в воде Оленьего ручья и р. Вуоннемйок отмечаются в период та-

яния снега и половодья, а также интенсивного выпадения дождей осенью, что подтверждает наше предположение о поступлении большого количества соединений Fe и Al в водные объекты именно в этот период с высокой турбулентностью потока в водотоках, а также то, что снег за длинную зиму накапливает большое количество пылевого материала с высоким содержанием этих металлов. В летнюю межень происходит резкое снижение содержания Fe и Al, что связано со снижением расходов и турбулентности потоков и, соответственно, значительным уменьшением поступления пылевого и взвешенного материала с высоким содержанием этих металлов. Высокое содержание Al отмечено в сточных водах карьера и подземного рудника – 3.8 и 1.1 мг/л соответственно, в карьере также зафиксировано высокое содержание Fe – 1.7 мг/л (табл. 4).

Таблица 4. Среднее содержание микроэлементов (мкг/л) в воде исследованных водных объектов

Table 4. Average content of trace elements (µg/l) in the water of the studied water bodies

№№	Al	Fe	Cu	Ni	Co	Zn	Mn	Sr	Pb	Cr	Cd
1	94	33	1.49	2.07	0.16	4.54	2.2	34	0.04	0.07	0.011
2	32	7	0.26	0.18	0.08	0.80	0.6	167	0.03	0.14	0.009
3	5500	1087	4.04	1.81	0.86	6.25	35.0	48	0.67	3.99	0.028
4	33	11	0.08	0.58	0.14	0.66	1.2	12	0.03	0.27	0.009
5	2286	795	3.39	1.01	0.90	7.61	57.5	610	0.54	0.92	0.020
6	11	6	0.19	0.01	0.13	0.67	0.3	35	0.00	0.15	0.013
7	125	65	0.86	0.23	0.25	1.37	4.9	191	0.01	0.09	0.008
8	137	68	1.21	0.45	0.13	1.13	4.9	464	0.03	0.28	0.017
9	1915	718	2.50	1.22	0.57	3.26	20.6	265	0.19	1.76	0.014
10	3760	1677	6.35	2.07	1.35	12.00	70.0	375	1.15	0.79	0.025
11	1070	145	1.55	0.14	0.25	1.95	7.6	216	0.13	8.09	0.013

В воде руч. Нагорный зафиксировано высокое содержание тяжелых металлов – Cu, Ni, Co, Zn, Mn и Pb, а наибольшее содержание тяжелых металлов (кроме Cr) выявлено в сточных водах карьера (табл. 4). Наибольшее содержание Cr обнаружено в сточных водах подземного рудника. Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что сточные воды карьера и подземного рудника являются наиболее загрязненными, и они являются основным источником поступления загрязняющих веществ в Олений ручей и оз. Комариное, и далее в оз. Умбозеро. Содержание тяжелых металлов, превышающих ПДК_{рбхз}, зафиксированы в р. Тульйок по Cu (ПДК_{рбхз} = 1 мкг/л), руч. Нагорный по Cu и Mn (ПДК_{рбхз} = 10 мкг/л), нижнем течении Оленьего ручья по Cu и Mn, оз. Комариное по Cu, р. Вуоннемйок по Cu и Mn, стоках карьера по Cu, Mn и Zn (ПДК_{рбхз} = 10 мкг/л), подземного рудника по Cu и Mn.

Закключение

Водные объекты в зоне деятельности ГОК «Олений ручей» четко делятся на две группы: фоновые и импактные. Среди фоновых водных объектов выделяются верховья ручьев гидрокарбонатно-натриевого состава, имеющие снеговое питание, с низкой минерализацией (10–12 мг/л) и значениями pH на границе между слабокислыми и нейтральными. Воды более крупных водотоков фоновой территории сохраняют соотношение преобладающих ионов, но в них значительно увеличивается минерализация (до 30–40 мг/л) и величина pH становится нейтральной (6.9–7.0), что является следствием увеличения площади водосбора и, соответственно, поверхностного и подземного стока и времени контакта вод с горными породами. В фоновых водных объектах на втором месте среди главных ионов находятся SO_4^{2-} и Ca^{2+} . Воды ручьев по мере продвижения к устьям значительно меняют свой химический состав вследствие того, что их русла проходят по техногенно нарушенным территориям, где лежат отвалы горных пород (содержащие кальций и сульфидные минералы), они загрязняются стоками рудников (с большим содержанием соединений азота в результате проведения буровзрывных работ). Вода ручьев увеличивает свою минерализацию на порядок, величину pH и изменяет качество с гидрокарбонатного класса на сульфатный или нитратный и с натриевой

группы на кальциевую. Сточные воды подземного рудника характеризуются повышенной минерализацией (до 260 мг/л) и величиной pH (до 10) и измененным химическим составом по сравнению с фоновыми объектами. Сточные воды подземного рудника и карьера имеют гидрокарбонатно-натриевый состав, с большой долей нитрат-иона, который стоит на втором месте среди анионов, а в сточных водах карьера содержания HCO_3^- и NO_3^- практически равны, содержание сульфат-иона высокое. В сточных водах рудников отмечены повышенные содержания соединений биогенных элементов, органического вещества и микроэлементов (Al, Fe, Sr, Cu, Mn, Zn и Cr).

Значительные изменения химического состава воды характерны для водных объектов, в которые поступают сточные воды рудников и хвостохранилищ, в отличие от горно-металлургических предприятий, загрязнение от которых в результате атмосферных выбросов может распространяться на десятки и сотни километров.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ИППЭС КНЦ РАН за выполнение полевых работ и химических анализов.

Работа выполнена в рамках тем НИР ФИЦ КНЦ РАН №№ FMEZ-2024-0014, FMEZ-2024-0004 и FMEZ-2022-0008.

Литература

1. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
2. Барабанов А. В., Калинина Т. А., Киселев А. А., Краснобаев А. И. Гигант в Хибинах. М. Изд-во: Руда и металлы, 1999. 288 с.
3. Даувальтер В. А., Даувальтер М. В. Гидрохимический режим озера Комариное, Хибинский щелочной массив, Мурманская область // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 158–162. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.029>.
4. Даувальтер М. В., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Слуковский З. И. Загрязнение горного озера стоками апатит-нефелинового производства // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 150–154. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.027>.
5. Даувальтер М. В., Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Слуковский З. И. Гидрохимический мониторинг поверхностных вод в зоне влияния деятельности ГОК «Олений Ручей» // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. 2022 а. № 19. С. 80–85. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.015>.
6. Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Слуковский З. И. Влияние стоков апатит-нефелинового производства на биогеохимические процессы в арктическом горном озере // Геохимия. 2022 б. Т. 67. № 10. С. 1013–1028. <https://doi.org/10.31857/S0016752522090023>.
7. 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>.
8. Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Кашулина Т. Г., Малиновский Д. Н., Вандыш О. И., Ильяшук Б. П., Кудрявцева Л. П. Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область). В 2 т. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН. 2008. Т. 1. 250 с. Т. 2. 282 с.
9. Кашулин Н. А., Беккелунд А., Даувальтер В. А., Петрова О. В. Апатитовое горно-обоганительное производство и эвтрофирование Арктического озера Имандра // Арктика: экология и экономика. 2019. Т. 35. № 3. С. 16–34. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-16-34>.
10. Легостаева Я. Б., Гололобова А. Г., Попов В. Ф., Макаров В. С. Геохимические свойства и трансформация микроэлементного состава почв при разработке коренных месторождений алмазов в Якутии // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212–225. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.35>.
11. Мироненко В. А., Мольский Е. В., Румынин В. Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л. Изд-во: Недра, 1988. 279 с.
12. Пашкевич М. А., Алексеев А. В., Нуреев Р. Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155–167. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.32>.
13. Семячков А. И., Почечун В. А., Семячков К. А. Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168–179. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>.

14. Сулименко Л. П., Кошкина Л. Б., Мингалева Т. А., Светлов А. В., Некипелов Д. А., Макаров Д. В., Мас-
лобоев В. А. Молибден в зоне гипергенеза Хибинского горного массива. Мурманск. Изд-во: МГТУ,
2017. 148 с.
15. Ферсман А. Е. Наш апатит. М. Изд-во: Наука, 1968. 136 с.
16. Чукарева М. А., Матвеева В. А. Современное гидрохимическое состояние гидроэкосистем, находящих-
ся под техногенным влиянием АО «Апатит» // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 685–690.
17. Шаповалов Н. А., Полуэктова В. А., Городов А. И., Крайний А. А., Винцовская И. Л., Рядинский М. М.
Отечественные фосфорсодержащие пав-активные собиратели комплексного обогащения апатит-
нефелиновых руд // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–8. С. 1689–1693.
18. Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П. Минералы Хибинского масси-
ва. М. Изд-во: Земля. 1999. 326 с.
19. Brožová K., Halfar J., Čabanová K., Motyka O., Drabinová S., Hanus P., Heviánková S. The first evidence
of microplastic occurrence in mine water: The largest black coal mining area in the Czech Republic // Water
Res. 2023. V. 244. 120538. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120538>.
20. Dauvalter V. A., Dauvalter M. V., Slukovskii Z. I. The dynamics of the chemical composition of surface water
in the zone of influence of North-West Phosphorous Company JSC // IOP Conf. Series: Earth and Environmen-
tal Science. 2020. V. 539. 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/539/1/012026>.
21. Dauvalter V., Slukovskii Z., Denisov D., Guzeva A. A Paleolimnological Perspective on Arctic Mountain Lake
Pollution // Water. 2022. V. 14. No. 24. P. 4044. <https://doi.org/10.3390/w14244044>.
22. Islam K., Murakami S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020 // Global Envi-
ron. Change. 2021. V. 70. P. 102361. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>.
23. Jung M. C. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au–Ag mine, Korea
// App. Geochem. 2001. V. 16. No. 11–12. P. 1369–1375. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00040-3).
24. Kidder J. A., McClenaghan M. B., Leybourne M. I., McCurdy M. W., Pelchat P., Layton-Matthews D., Voinot A.
Hydrogeochemistry of porphyry-related solutes in ground and surface waters; an example from the Casino
Cu–Au–Mo deposit, Yukon, Canada // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2022. V. 22. No. 2.
geochem2021-058. <https://doi.org/10.1144/geochem2021-058>.
25. Lee C. G., Chon H.-T., Jung M. C. Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au–Ag–Pb–
Zn mine in Korea // App. Geochem. 2001. V. 16. No. 11–12. P. 1377–1386. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00038-5).
26. Merrington G., Alloway B. The transfer and fate of Cd, Cu, Pb and Zn from two historic metalliferous mine
sites in the UK // App. Geochem. 1994. V. 9. No. 6. P. 677–687. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(94\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0883-2927(94)90027-2).
27. Pacheco F. A. L., do Valle Junior R. F., de Melo Silva M. M. A. P., Pissarra T. C. T., de Souza Rolim G.,
Carvalho de Melo M., Valera C. A., Moura J. P., Sanches Fernandes L. F. Geochemistry and contamination
of sediments and water in rivers affected by the rupture of tailings dams (Brumadinho, Brazil) // App. Geo-
chem. 2023. V. 152. P. 105644. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105644>.
28. Standard method for examination for water and wastewater. 20-th Edition (Eds. Clescerl L. S., Greenberg A. E.,
Eaton A. D.). Washington: American Public Health Association USA, 1999. 2671 p.