

Химический состав подземных вод в зоне влияния ГОК «Олений Ручей» АО «Северо-Западная Фосфорная Компания»

Даувальтер В. А.¹, Даувальтер М. В.², Слукровский З. И.¹

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

² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, m.dauvalter@ksc.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования гидрохимического преобразования подземных вод в зоне разработки апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного горного массива. За 10-летнюю историю деятельности ГОК «Олений Ручей» АО «Северо-Западная Фосфорная Компания» произошли значительные изменения химического состава подземных вод водоносных комплексов верхнечетвертичного ошашковского водно-ледникового горизонта f,lgQIIIos и кристаллических пород палеозойских интрузий уPz. Сумма главных ионов в воде увеличилась до 4 раз, величина pH до 9 ед., концентрация NO_3^- – в десятки раз, Ca^{2+} и Cl^- – на порядок, других основных ионов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ и K^+) – более чем в 2 раза, щелочноземельного металла Sr – в 5 раз. Причинами поступления основных ионов и повышения минерализации в подземные воды являются выветривание и выщелачивание главных рудных минералов – апатита и его разновидностей, нефелина, сульфидных минералов, а также использование взрывчатых веществ, содержащих азотные соединения. В результате этого гидрохимического преобразования подземных вод изменилось соотношение главных ионов – природная вода гидрокарбонатно-натриевого состава с нейтральными значениями pH в настоящее время стала обогащенной HCO_3^- - Ca^{2+} , при подчиненных содержаниях нитрат- и натрий- ионов. Режим подземных вод месторождения Олений Ручей относится к сезонному типу, в котором четко выражены весенние и осенние максимумы уровней подземных вод. Во время снижения уровня подземных вод к скважинам подтягиваются загрязненные рудничные воды, а в период таяния снега и выпадения дождей происходит разбавление подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков в водоносные горизонты.

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

Chemical composition of groundwater in the zone of influence of the Mining and Processing Plant «Oleniy Ruchey» of North-West Phosphorus Company JSC

Dauvalter V. A.¹, Dauvalter M. V.², 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, m.dauvalter@ksc.ru

Abstract. The article presents the results of a study of hydrochemical transformation of groundwater in the zone of influence of apatite-nepheline ore mining in the southeastern part of the Khibiny alkaline mountain massif. Over the 10-year history of the Oleniy Ruchey Mining and Processing Plant of North-West Phosphorous Company JSC, significant changes in the chemical composition of groundwater in the aquifers of the Upper Quaternary Ostashkovskiy fluvioglacial horizon f,lgQIIIos and crystalline rocks of the Paleozoic intrusions уPz have occurred. The sum of the main ions in water increased up to 4 times, the pH value up to 9 units, the concentration of NO_3^- – by tens of times, Ca^{2+} and Cl^- – by an order of magnitude, other main ions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ and K^+) – more than 2 times, alkaline earth metal Sr – 5 times. The reasons of the main ions and increased mineralization in groundwater are the weathering and leaching of the main ore minerals – apatite and its varieties, nepheline, sulfide minerals, as well as the use of explosives containing nitrogen compounds. As a result of this hydrochemical transformation of groundwater, the ratio of the main ions has changed - natural water of hydrocarbonate-sodium composition with neutral pH values has now become HCO_3^- - Ca^{2+} , and nitrate and sodium ion are in second place. The groundwater regime of the Oleniy Ruchey deposit is of the seasonal type in which spring and autumn maximums of groundwater levels are clearly expressed. During a decrease in the groundwater level, contaminated mine waters are drawn to the wells, and during the period of snow melting and rainfall, groundwater is diluted due to the infiltration of atmospheric precipitation into aquifers.

Key words: Arctic, Khibiny, anthropogenic load, groundwater, water quality, apatite-nepheline production.

Введение

К сожалению, помимо безусловной пользы для народного хозяйства, горнодобывающая промышленность вносит значительный вклад в загрязнение окружающей среды. В процессе отработки месторождений полезных ископаемых (МПИ) огромная масса горных пород перемещается на поверхность земли, вовлекая минералы и химические элементы в их составе в геохимические процессы, что приводит к загрязнению природных вод, в том числе и подземных, на прилегающих территориях (Мироненко и др., 1989). Чтобы представить масштабы подобных процессов, можно привести наглядный пример – за 95 лет разработки месторождений АО «Апатит» в Хибинах было добыто (извлечено на поверхность) 2.2. млрд т апатит-нефелиновых руд. При этом рудничные сточные воды представляют существенную угрозу для водных экосистем на территориях разработки МПИ. Гидрохимические преобразования подземных вод связаны с проникновением в них повышенных содержаний элементов и загрязняющих веществ из звеньев технологической цепочки горнорудного предприятия (карьер, подземная горная выработка, массивы отвальных пород, хвостохранилища, пруды-отстойники) вследствие нарушений естественного гидродинамического и гидрохимического режима (Мироненко и др., 1980; Легостаева и др., 2023; Пашкевич и др., 2023; Семячков и др., 2023). В преобразованных человеком пространствах горных пород осуществляются геохимические процессы, отличные от природных, что приводит к образованию специфического химического состава подземных вод (Qu et al., 2022; Li et al., 2024). Шахтные воды, содержащие в повышенных концентрациях токсичные соединения, поступают в природные воды в зонах влияния горнорудных предприятий. Эти вещества, аккумулированные в отходах горной промышленности, отрицательно влияют не только на звенья окружающей среды, но и на здоровье населения, в том числе и детского (Reutova et al., 2022). Серьезная проблема влияния горнорудной промышленности на состояние природных вод заключается в поступлении соединений азота, используемых при проведении буровзрывных работ в горных выработках (Мироненко и др., 1989), а также сульфатов вследствие выщелачивания и растворения сульфидных минералов в составе горных пород разрабатываемых МПИ (медно-никелевых, свинцово-цинковых, железорудных, угольных и т. д.) (Мироненко и др., 1980; Кашулин и др., 2008). Для анализа степени гидрохимической эволюции природных вод применяются различные гидрохимические методы, например, определение доли основных ионов, изотопные соотношения, моделирование и математическая статистика (Мироненко и др., 1980; Ерзова и др., 2023). Изменение окислительно-восстановительной обстановки и кислотно-щелочной среды, влекущие за собой выщелачивание и растворение минералов, усиливают ионный обмен и поступление повышенных концентраций элементов и загрязняющих веществ в подземные воды, что приводит к их гидрохимическому преобразованию (Qu et al., 2023).

Акционерное общество «Северо-Западная Фосфорная Компания» (АО «СЗФК») производит разработку месторождения апатит-нефелиновых руд Олений Ручей в юго-восточной части Хибинского щелочного массива немногим более 10 лет. В 2012 г. было завершено строительство первой очереди одноименного горно-обогачительного комбината, выполнены пусконаладочные работы обогатительной фабрики и получены первые тонны апатитового концентрата. Сточные воды карьера и подземного рудника поступают в оз. Комариное и далее выносятся в юго-западную акваторию Умбозера – самого глубокого (115 м) водоема Мурманской области. Геологическое строение, история освоения и результаты исследований поверхностных вод в зоне разработки апатит-нефелинового месторождения Олений Ручей в юго-восточной части Хибинского щелочного массива описаны в публикациях (Даувальтер и др., 2022, 2023, 2024).

Основной целью данной работы является исследование гидрохимического преобразования подземных вод вследствие протекания геохимических процессов на территории разработки апатит-нефелинового месторождения Олений Ручей.

Материалы и методы

Изменения химического состава и уровня подземных вод исследовался в период 2009–2023 гг. в скважинах 43 и 59 в карьере и у хвостохранилища рудника и пробуренных на водоносный комплекс

палеозойских интрузий уРz, в скважинах 51 и 6э у хвостохранилища и на водозаборе ГОК «Олений Ручей» и оборудованных на водоносный верхнечетвертичный ошашковский водно-ледниковый горизонт f₁lgQIIIos (рис. 1). Пробы подземных вод во всех скважинах отбирались сотрудниками АО «СЗФК» 4 раза в год – в конце зимы, в половодье, в летнюю межень, в начале зимнего периода. В скважинах при отборе проб на химический анализ производился также замер уровней воды. В образцах вод анализировались концентрации основных ионов и значения рН. Химический анализ проб подземных вод выполнялся в лаборатории АО «Кольский геологический информационно-лабораторный центр» (г. Апатиты), имеющей аттестат аккредитации.

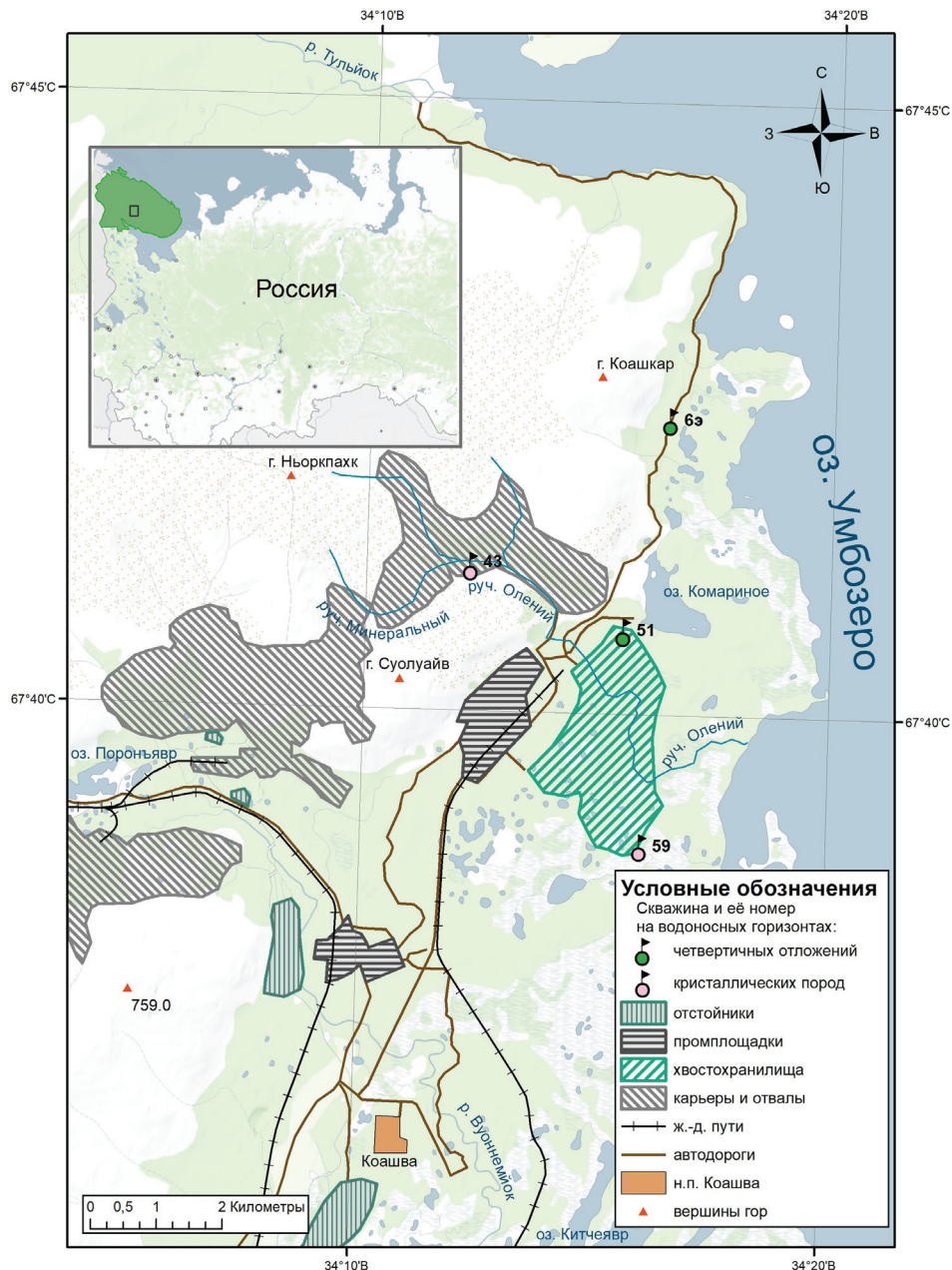


Рис. 1. Карта-схема расположения ГОК «Олений Ручей» и гидрогеологических скважин
Fig. 1. Schematic map of the location of the Oleniy Ruchey Mining and Processing Plant and hydrogeological wells

Результаты и обсуждение

Разрез четвертичных и палеозойских водоносных пород представлен соответственно хорошо проницаемыми песчаными и гравийно-галечными ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями-

ми с тонкими прослоями пылевой супеси и нефелиновыми сиенитами, обладающими трещиноватостью. Гидравлическая связь подземных вод с атмосферными осадками и поверхностными водами объясняет совпадение области питания, распространения и разгрузки подземных вод. Разгрузка водоносных горизонтов четвертичных отложений и трещиноватых кристаллических пород происходит в местные понижения рельефа, а именно в разработанные ручьями Минеральный и Олений долины и далее в приозерную низменность Умбозера (рис. 1). Урез воды в озере Умбозеро имеет наименьшую абсолютную отметку, составляющую 150 м. Для грунтового водоносного горизонта четвертичных отложений диапазон колебаний уровня в течение года составляет 15–30 м; для водоносного горизонта кристаллических пород – 20–30 м – в долинах ручьев; 40–90 м – на склонах гор.

Водоносный верхнечетвертичный осташковский водно-ледниковый горизонт грунтовых вод f,lgQIIIos и водоносный комплекс палеозойских интрузий уРз имеют тесную гидравлическую связь с атмосферными осадками и поверхностными водами, и изменение уровней воды в скважинах происходит в соответствии с сезонами года и выпадением осадков. Подземные воды апатит-нефелинового месторождения Олений Ручей имеют гидродинамический режим сезонного типа с весенними и осенними максимумами и зимними минимумами уровней. Во время снеготаяния и выпадения дождей происходит резкий подъем уровня подземных вод, а в меженное зимнее и летнее время без осадков происходит его снижение. В скважинах 43 и 6э установлено достоверное снижение среднегодовых уровней воды за более чем 10-летний период добычи апатит-нефелинового сырья (на 10 и 2 м соответственно), что связано с увеличением глубины карьера и снижением положения уровня подземных вод при водозаборе из зумпфа карьера и при водозаборе подземных вод комплекса палеозойских интрузий и осташковского горизонта соответственно. До 40 и 7 м происходят сезонные колебания уровня подземных вод в скважинах 43 и 6э соответственно. Уровень пульпы в хвостохранилище несущественно зависит от сезонов водного режима природных вод, поэтому в скважинах 51 и 59 изменения уровней незначительны.

Подземные воды Хибинского щелочного массива по химическому составу относятся к низко минерализованным водам (40-60 мг/л) с нейтральными значениями рН, гидрокарбонатного класса и натриевой группы (Кашулин и др., 2008). Особенностью химического состава подземных и поверхностных вод Хибинского щелочного массива является повышенное относительное содержание катиона K^+ , которое сопоставимо по содержанию с катионом Ca^{2+} (Даувальтер и др., 2022), тогда как подземные и поверхностные воды равнинных территорий Мурманской области, не получающие прямое загрязнение промышленных предприятий, характеризуются гидрокарбонатным классом и кальциевой группой, и катион K^+ находится, как правило, на последнем месте среди основных катионов (Moiseenko et al., 1995).

Отбор образцов подземных вод в скв. 43 производился начиная с 2009 г., поэтому результаты химического анализа до разработки апатит-нефелинового месторождения Олений Ручей можно взять как фоновые значения. В скв. 43 подземные воды были $HCO_3^-Na^+$ состава (рис. 2, квадрат 1), с незначительной минерализацией (до 50 мг/л) и величиной рН на стыке слабощелочного и нейтрального значения (6.5). В последние годы сумма основных ионов повысилась до 200 мг/л, величина рН до 9, что соответствует щелочному значению (табл. 1). При добыче апатит-нефелиновых руд обычно используются азотсодержащие взрывчатые вещества, которые, попадая в подземные воды, растворяются и увеличивают содержание в них азотных соединений, главным образом NO_3^- . Поэтому содержание нитратов в воде скв. 43 повысились в десятки раз. С момента добычи руды на месторождении концентрации нитратов возросли во всех скважинах (рис. 3). Причиной поступления Ca^{2+} в подземные воды является выветривание основного рудного минерала, фторапатита ($Ca_5(PO_4)_3F$), а источником ионов щелочных металлов Na^+ и K^+ является другой рудный минерал – нефелин ($(Na,K)AlSiO_4$). В апатит-нефелиновых породах встречаются другие разновидности апатита – карбонат-фторапатит $Ca_5[PO_4CO_3(OH)]_3F$, хлорапатит ($Ca_5(PO_4)_3Cl$) и стронциоapatит $Sr_3Ca_2[PO_4]_3F$ (Яковенчук и др., 1999).

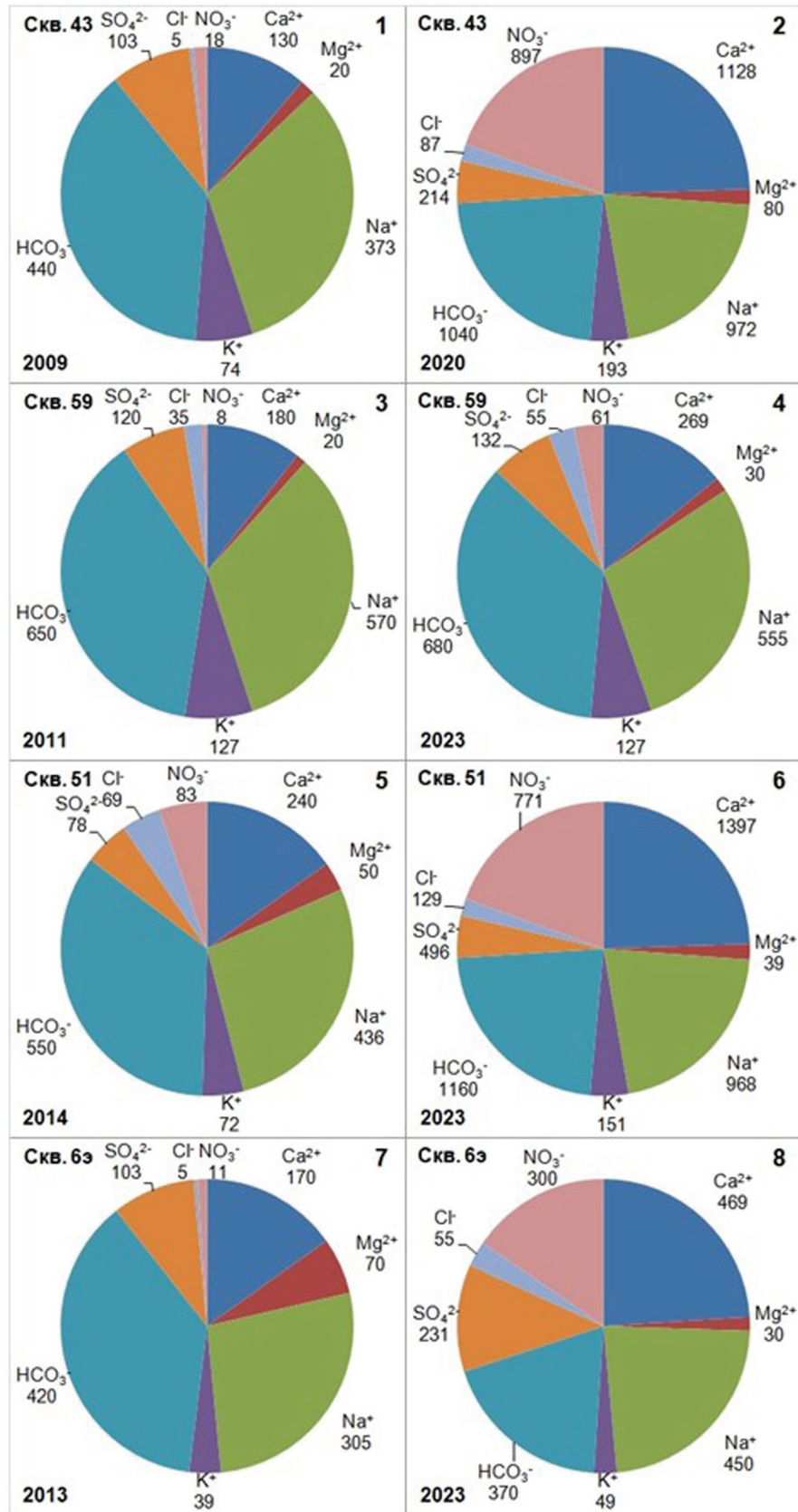


Рис. 2. Динамика эквивалентных концентраций (мкг-экв/л) главных ионов в подземных водах за период деятельности ГОК «Олений Ручей»

Fig. 2. Dynamics of equivalent concentrations (μg-eq/l) of the main ions in groundwater during the period of operation of the Mining and Processing Plant «Oleniy Ruchey»

Таблица 1. Средние (в числителе), минимальные и максимальные (в знаменателе) значения величины рН, содержания главных ионов и минерализации (М) (мг/л) в воде исследуемых скважин ГОК «Олений Ручей»

Table 1. Average values of pH, content of basic ions and mineralization (M) (mg/l) in water of the studied wells of the Mining and Processing Plant «Oleniy Ruchey»

Скважина	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	М
Скв. 43	<u>8.22</u> 5.5–9.15	<u>12.6</u> 2.6–22.6	<u>0.73</u> 0.12–1.9	<u>16.0</u> 7.5–22.4	<u>5.6</u> 2.2–9.9	<u>33.2</u> 17.1–68	<u>17.9</u> 2.8–54	<u>2.1</u> 0.2–3.1	<u>30.6</u> 1.1–56	<u>119</u> 47–186
Скв. 59	<u>8.41</u> 6.26–9.2	<u>4.5</u> 2.6–8.6	<u>0.65</u> 0.12–1.9	<u>12.6</u> 10.7–14	<u>5.2</u> 4.6–6.0	<u>43.3</u> 37.2–48	<u>5.2</u> 3.3–9.5	<u>1.9</u> 0.2–5.2	<u>1.7</u> 0.3–4.0	<u>75</u> 68–84
Скв. 51	<u>7.59</u> 6.07–8.5	<u>18.3</u> 4.6–43.2	<u>1.48</u> 0.24–3.6	<u>19.3</u> 9.4–37.8	<u>5.4</u> 2.7–10.2	<u>61.9</u> 31.7–112	<u>21.0</u> 2.9–82.1	<u>3.9</u> 1.8–6.7	<u>27.6</u> 5.2–61.1	<u>159</u> 61–304
Скв. 6э	<u>7.97</u> 5.65–8.6	<u>4.3</u> 2.8–9.4	<u>0.59</u> 0.12–1.7	<u>7.8</u> 6.4–11.7	<u>1.6</u> 1.1–2.7	<u>25.6</u> 18.3–31	<u>4.1</u> 0.5–11.1	<u>1.5</u> 0.2–3.0	<u>3.2</u> 0.1–18.6	<u>49</u> 39–76

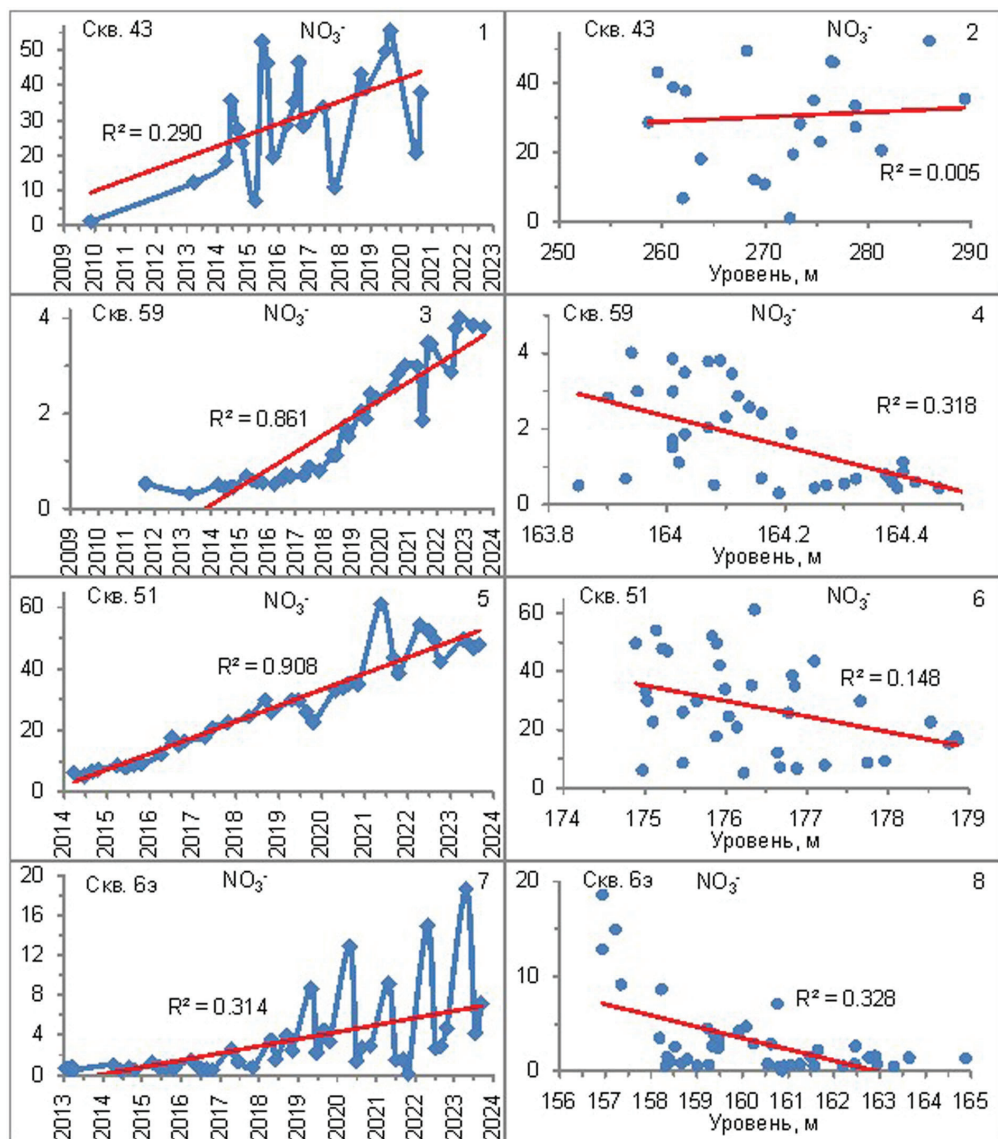


Рис. 3. Динамика содержания нитратов (мг/л) и зависимость содержания нитратов от уровня воды в исследуемых скважинах

Fig. 3. Dynamics of nitrate content (mg/l) and dependence of nitrate content on water level in the studied wells

Сульфидные минералы, содержащиеся в рудных телах месторождения Олений Ручей, например, сфалерит ZnS , халькопирит $CuFeS_2$, халькозин Cu_2S , и многие другие (Яковенчук и др., 1999) являются источником поступления ионов SO_4^{2-} в подземные воды. В результате выветривания этих минералов в природные воды вносятся основные ионы, и содержание Ca^{2+} в воде скв. 43 увеличилось на порядок, Cl^- – почти в 20 раз, щелочноземельного Sr – в 5 раз, других главных ионов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ и K^+) – более чем в 2 раза. Поэтому подземные воды имеют HCO_3^- – Ca^{2+} состав, а нитраты и натрий занимают второе место среди основных ионов (рис. 2 квадрат 2).

В Хибинских малых горных озерах, расположенных на абсолютных отметках более 400 м, отношение эквивалентных концентраций главных анионов $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ в среднем равно 2.4, $[HCO_3^-]/[Cl^-]$ – 6.3, сумм ионов щелочноземельных и щелочных металлов $[Ca^{2+}+Mg^{2+}]/[Na^++K^+]$ – 0.13 (Даувальтер и др., 2022). В пробах подземных вод, отобранных из скв. 43 до начала разработки месторождения Олений Ручей, соотношения между указанными главными ионами были выше – 4.3, 89 и 0.33 соответственно, что связано с большим временем контакта горных пород с подземными водами и более существенным влиянием процессов выщелачивания и растворения на формирование химического состава подземных вод по сравнению с поверхностными. Выщелачивание и растворение апатита и его примесей также имеют большое влияние на формирование химического состава подземных вод, в результате чего с начала разработки месторождения соотношения между главными ионами в воде скв. 43 в настоящее время достигли 4.9, 12, 1.04 соответственно.

Сточные воды подземного рудника и карьера ГОК «Олений Ручей» имеют гидрокарбонатно-натриевый состав, с большой долей нитрат-иона, который стоит на втором месте среди анионов (Даувальтер и др., 2024). Отношения эквивалентных концентраций главных ионов $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ равны 1.9 и 1.4, $[HCO_3^-]/[Cl^-]$ – 8.7 и 9.4 и $[Ca^{2+}+Mg^{2+}]/[Na^++K^+]$ – 0.19 и 0.60 в водах подземного рудника и карьера соответственно. Это свидетельствует о большем участии процессов выщелачивания и растворения нефелина и сульфидов при образовании сточных вод горнорудного предприятия. Подземный апатит-нефелиновый Расвумчоррский рудник АО «Апатит», расположенный в юго-западной части Хибинского горного массива и функционирующий с середины 1950-х годов, сбрасывает минерализованные сточные воды (минерализация 840 мг/л приближается к солоноватым водам) в р. Юкспоррйок водосбора оз. Большой Вудъявр и характеризуется сульфатно-натриевым составом с высоким содержанием ионов HCO_3^- и K^+ , которые находятся на втором месте среди анионов и катионов соответственно (Кашулин и др., 2008). Отношения эквивалентных концентраций главных ионов $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$, $[HCO_3^-]/[Cl^-]$ и $[Ca^{2+}+Mg^{2+}]/[Na^++K^+]$ в сточных водах этого рудника, функционирующего почти 70 лет, отличаются и равны 0.57, 16.6 и 0.09 соответственно, что свидетельствует о еще более значительном участии процессов выщелачивания и растворения нефелина и сульфидов в формировании химического состава сточных вод.

Достоверные разнонаправленные зависимости изменения концентраций главных ионов от положения уровня воды в скв. 43 были зафиксированы для анионов HCO_3^- и SO_4^{2-} (рис. 4). При повышении уровня воды в водоносном горизонте за счет инфильтрации растаявшего снега и выпавших атмосферных осадков, содержащих незначительные концентрации гидрокарбонатов, происходит снижение их содержания за счет разбавления. При формировании сульфатов, возможно, действует другой механизм. Весьма вероятно, что в условиях понижения уровня подземных вод в зоне аэрации происходит окисление сульфидных минералов до сульфатов при наличии пленочной воды, кислорода воздуха и активном участии серобактерий, а при повышении уровня образовавшиеся сульфаты увеличивают их содержание в подземных водах.

Значительные изменения химического состава зафиксированы в подземных водах скв. 51, пересекающей водно-ледниковый горизонт $f,lgQIIos$. Здесь происходят отчетливые сезонные флуктуации уровня воды. За время разработки месторождения Олений Ручей сумма главных ионов возросла в разы (до 200 мг/л), концентрации NO_3^- и Sr – в десять раз, кальция – в 6 раз, и подземные воды преобразовались в HCO_3^- – Ca^{2+} с внушительной частью NO_3^- и Na^+ . Озеро Комариное, служащее в качестве отстойника рудничных вод, располагается вблизи от скв. 51. Существенные преобразования химического состава воды оз. Комариное зафиксированы в последние 10 лет (Даувальтер

и др., 2024), по соотношению основных ионов воды в озере и в скв. 51 подобны, и это подтверждает гидравлическую связь между ними. Вода оз. Комариное гидрокарбонатно-натриевая, но содержание Ca^{2+} практически вплотную приблизилось к содержанию Na^+ , а SO_4^{2-} к HCO_3^- . Соотношение главных ионов в скв. 51 и оз. Комариное несколько отличается, что говорит о разных механизмах формирования химического состава в поверхностных и подземных водах. Соотношение $[\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}]/[\text{Na}^++\text{K}^+]$ в воде скв. 51 и оз. Комариное равно 1.28 и 0.83 соответственно, а $[\text{HCO}_3^-]$ и $[\text{SO}_4^{2-}]$ – 2.3 и 1.2, что говорит о большем обогащении продуктами растворения и выщелачивания минералов, входящих в состав горных пород разрабатываемого месторождения, в воде скв. 51, чем в оз. Комариное. Это предположение подтверждается тем, что вода в скв. 51 более интенсивно минерализована по сравнению с водой в оз. Комариное (153 мг/л). В оз. Комариное поступают также менее минерализованные воды поверхностного стока с незначительным периодом контакта с горными породами.

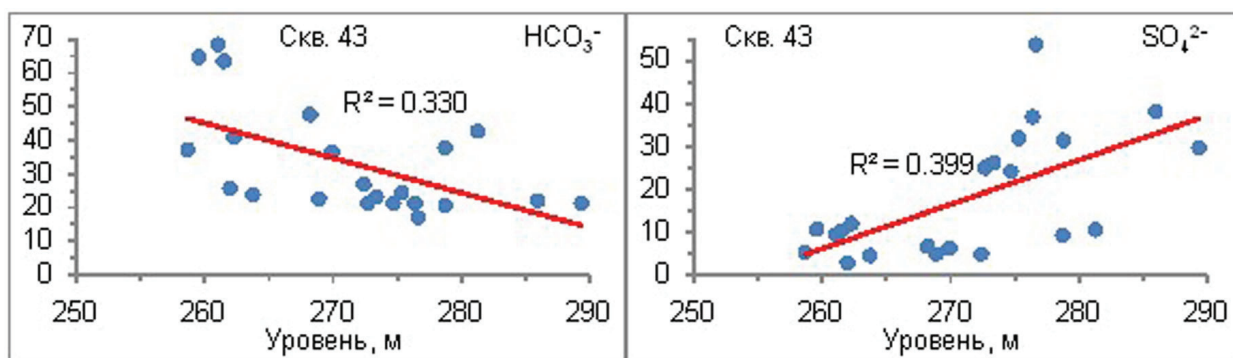


Рис. 4. Зависимость содержания гидрокарбонатов и сульфатов (мг/л) от уровня воды в скв. 43
Fig. 4. Dependence of the content of hydrocarbonates and sulfates (mg/l) on the water level in well 43

В пробах подземных вод скв. 59 существенных преобразований не зафиксировано, подземные воды остаются $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ по преобладающим основным ионам, возросли содержания NO_3^- (4 мг/л), а интенсивность минерализации, а вместе с ней и содержание главных ионов, увеличилась незначительно – с 69 до 77 мг/л. Водно-ледниковый горизонт грунтовых вод в скв. 51 имеет более тесную гидравлическую связь с водами хвостохранилища, чем воды палеозойского водоносного комплекса в скв. 59. Это подтверждается также подобным соотношением главных ионов в воде скв. 43, отобранной до начала разработки в 2009 г., и воде скв. 59, отобранной в 2023 г. – $[\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}]/[\text{Na}^++\text{K}^+]$ 0.33 и 0.44 и $[\text{HCO}_3^-]$ и $[\text{SO}_4^{2-}]$ 4.3 и 5.2 соответственно (рис. 2, квадрат 1 и квадрат 4).

В скв. 6э подземного водозабора рудника подземные воды $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ состава по преобладающим основным ионам эволюционировали в воды состава $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$. Содержания ионов нитратов и натрия в скважине 6э немного меньше концентраций преобладающих ионов, концентрации Cl^- возросли на порядок, а концентрации SO_4^{2-} и сумма главных ионов – в 2 раза (рис. 2 квадрат 7 и квадрат 8). До разработки месторождения Олений Ручей химический состав воды в скв. 6э по составу сходен с таковым из недалеко текущего ручья Теплый (с минерализацией 40 мг/л), в который не поступают прямые стоки комбината (Даувальтер и др., 2024). Отношение эквивалентных концентраций $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ было равно 4.1 и 5.3 соответственно в скв. 6э и руч. Теплый, а $[\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}]/[\text{Na}^++\text{K}^+]$ – 0.70 и 0.45 соответственно. В настоящее время, спустя десятилетие разработки месторождения Олений ручей, увеличилась доля SO_4^{2-} и Ca^{2+} и соотношения $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ и $[\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}]/[\text{Na}^++\text{K}^+]$ стали 1.6 и 1.0. Это говорит о значительном увеличении доли загрязненных рудничных вод в питании подземных вод ошашковского водно-ледникового горизонта. В пользу этого говорит также то, что в скв. 6э установлено достоверное снижение содержания главных ионов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Na^+), а также минерализации, Sr и NO_3^- с повышением уровня воды (рис. 3, квадрат 8 и рис. 5). Во время снижения уровня к скважине подтягиваются загрязненные рудничные воды, а в период таяния снега и выпадения дождей происходит разбавление низко минерализованными водами за счет инфильтрации атмосферных осадков в первый от поверхности водоносный

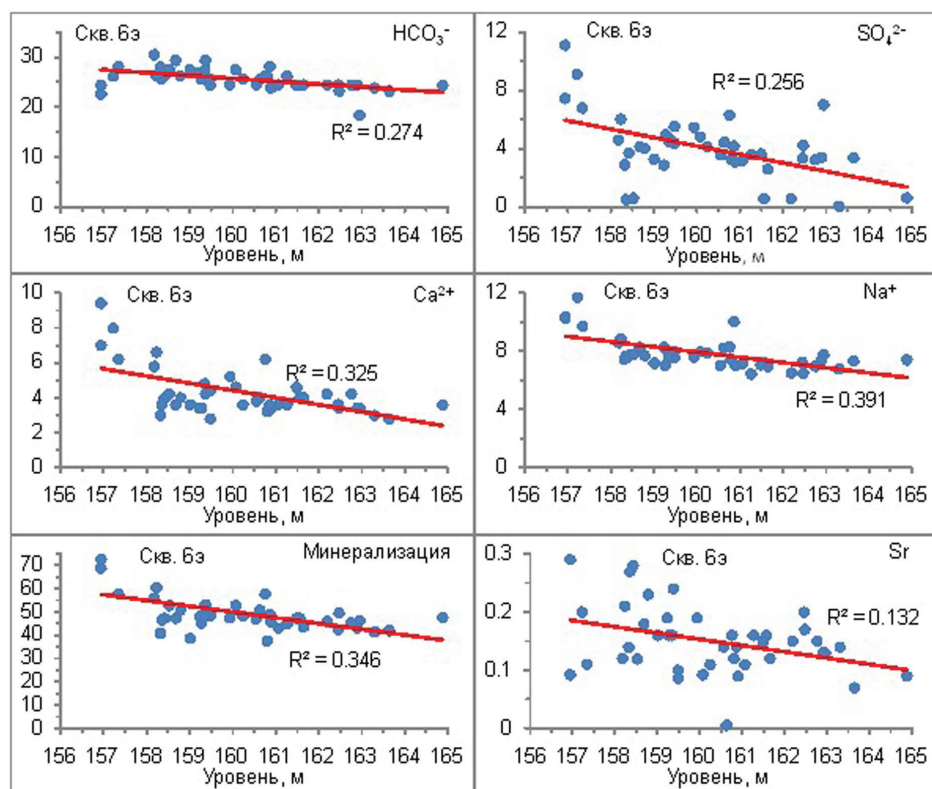


Рис. 5. Зависимость минерализации, содержания главных ионов и стронция (мг/л) от уровня воды в скважине 63
Fig. 5. Dependence of mineralization, content of basic ions and strontium (mg/l) on the water level in well 63

горизонт. Об увеличении роли рудничных вод в формировании химического состава подземных вод в скв. 63 говорит также увеличение доли нитратов – соотношение между $[\text{HCO}_3^-/\text{NO}_3^-]$ за десятилетний период разработки месторождения уменьшилось с 37 до 1.2 (рис. 2, квадрат 7 и квадрат 8).

Заключение

Гидрохимические преобразования в зоне влияния нового для Мурманской области горно-рудного предприятия ГОК «Олений Ручей» были выявлены в результате мониторинга химического состава подземных вод. Изменение качества подземных вод и соотношения основных ионов, увеличение степени их минерализации фиксируется в настоящее время, спустя десятилетие разработки апатит-нефелинового месторождения Олений Ручей. Выветривание и выщелачивание главных рудных минералов (апатита и его разновидностей, нефелина, сульфидных минералов), использование взрывчатых веществ, содержащих азотные соединения, а также изменение структуры потока подземных вод в результате увеличения глубины горных выработок и откачки подземных вод для водоснабжения рудника являются главными причинами модификации химического состава подземных вод на территории рудника и прилегающих ландшафтов. Эволюционные модификации подземных вод отмечаются главным образом в зоне деятельности ГОК «Олений Ручей», куда поступают сточные воды горных выработок, отвалов горных пород, обогатительной фабрики, и где отмечаются флуктуации зеркала подземных вод. Загрязняющее воздействие предприятий горно-металлургического комплекса (Печенгская и Мончегорская площадка Кольской горно-металлургической компании – дочернее предприятие ПАО «ГМК «Норильский никель») в результате поступления химических элементов и их соединений в повышенных относительно фоновых значений в атмосферу и природные воды, может распространяться на десятки и сотни километров.

Благодарности

Работа выполнена в рамках тем НИР Кольского научного центра РАН №№ FMEZ-2024-0014 и FMEZ-2024-0004.

Литература

1. Даува́льтер М. В., Даува́льтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Слуковский З. И. Гидрохимический мониторинг поверхностных вод в зоне влияния деятельности ГОК «Олений Ручей» // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 80–85. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.015>.
2. Даува́льтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Даува́льтер 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>.
3. Даува́льтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Даува́льтер 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>.
4. Ерзова В. А., Румынин В. Г., Никуленков А. М., Владимиров К. В., Судариков С. М., Вилькина М. В. Прогноз миграции радионуклидов в подземных водах в зоне влияния строительного дренажа Ленинградской АЭС-2 // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 194–211. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.27>.
5. Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Сандимиров С. С., Даува́льтер 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). Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН. 2008. Т. 1 250 с. Т. 2 282 с.
6. 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>.
7. Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учаев В. К. Охрана подземных вод в горнопромышленных районах (опыт гидрогеологических исследований). Л. Изд-во: Недра, 1980. 320 с.
8. Мироненко В. А., Мольский Е. В., Румынин В. Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л. Изд-во: Недра, 1988. 279 с.
9. Пашкевич М. А., Алексеенко 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>.
10. 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>.
11. Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П. Минералы Хибинского массива. М. Изд-во: Земля, 1999. 326 с.
12. Li Y., Wang Q., Jiang C., Li C., Hu M., Xia X. Spatial characteristics and controlling indicators of major hydrochemical ions in rivers within coal-grain composite areas via multivariate statistical and isotope analysis methods // Ecological Indicators. 2024. V. 158, No. 111352. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111352>.
13. Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Rodyushkin I. V., Dauvalter V. A., Lukin A. A., Kashulin N. A. Airborne contaminants by heavy metals and aluminium in the freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia) // Science of the Total Environment. 1995. V. 160/161. P. 715–727. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04405-P](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04405-P).
14. Qu S., Wang G., Shi Z., Zhu Z., Wang X., Jin X. Impact of Mining Activities on Groundwater Level, Hydrochemistry, and Aquifer Parameters in a Coalfield's Overburden Aquifer // Mine Water and the Environment. 2022. V. 41. P. 640–653. <https://doi.org/10.1007/s10230-022-00875-6>.
15. Qu S., Liao F., Wang G., Wang X., Shi Z., Liang X., Duan L., Liu T. Hydrochemical evolution of groundwater in overburden aquifers under the influence of mining activity: combining hydrochemistry and groundwater dynamics analysis // Environmental Earth Sciences. 2023. V. 82, No. 135. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10817-2>.
16. Reutova N. V., Reutova T. V., Dreeva F. R., Shevchenko A. A. Long-term impact of the Tyrnyauz tungsten–molybdenum mining and processing factory waste on environmental pollution and children's population // Environmental Geochemistry and Health. 2022. V. 44. P. 4557–4568. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01221-z>.