ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Гидрохимическая эволюция подземных вод в результате десятилетней разработки месторождения апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного массива

В.А.Даувальтер[1]✉, **М.В.Даувальтер**[2], **З.И.Слуковский**[1]
[1] *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[2] *Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

Как цитировать эту статью: Даувальтер В.А., Даувальтер М.В., Слуковский З.И. Гидрохимическая эволюция подземных вод в результате десятилетней разработки месторождения апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного массива // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 172-186. EDN LYZOIE

Аннотация
Подземные воды являются одним из ключевых природных ресурсов, поэтому сохранение их высокого качества – основная проблема при добыче полезных ископаемых. Цель статьи – исследование динамики уровенного и гидрохимического режима подземных вод в зоне влияния добычи апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного горного массива. За десятилетнюю историю деятельности ГОК «Олений Ручей» АО «Северо-Западная Фосфорная Компания» произошли существенные изменения химического состава исследуемых подземных вод водоносных комплексов верхнечетвертичного осташковского водно-ледникового горизонта f,lgQIIIos и палеозойских интрузий γPz. Содержание главных ионов увеличилось от 2 до 20 раз, нитратов до 50 раз (превышая предельно допустимую концентрацию – 45 мг/л), и NO_3^- вошел в разряд главных ионов подземных вод. Источником повышения минерализации и поступления основных ионов 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 гидрохимической эволюции подземных вод изменилось соотношение главных ионов – природная вода гидрокарбонатно-натриевого состава с нейтральными значениями pH в настоящее время стала гидрокарбонатно-кальциевой, на втором месте среди анионов стоят NO_3^-, среди катионов – Na^+. В гидродинамическом режиме подземных вод месторождения Олений Ручей четко выражены весенние и осенние максимумы уровней подземных вод. Во время снижения уровня к скважинам подтягиваются загрязненные более минерализованные рудничные воды, а во время повышения уровня в водоносные горизонты инфильтруются низкоминерализованные воды атмосферных осадков. Установлено снижение среднегодовых уровней подземных вод, что связано с увеличением глубины карьера и водозабором подземных вод для водоснабжения рудника.

Ключевые слова
подземные воды; горно-рудное предприятие; гидрохимическая эволюция; хвостохранилища; карьеры

Финансирование
Работа выполнена в рамках тем научно-исследовательских работ КНЦ РАН № FMEZ-2024-0014 и FMEZ-2024-0004.

Поступила: 01.11.2024 ***Принята: 10.04.2025*** ***Онлайн: 12.09.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Подземные воды являются одним из основных источников водоснабжения населения и промышленных предприятий, а также играют жизненно важную роль в экономическом развитии многих стран мира [1-3]. Вследствие лучшего качества по сравнению с поверхностными водами для водоснабжения предпочтительнее использовать подземные воды [4]. В Мурманской обл. подземные воды применяются для водоснабжения г. Кировск и пос. Коашва, а также горно-рудных предприятий АО «Апатит», АО «СЗФК» и др. Однако для урбанизированных территорий и площадок

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

размещения промышленных предприятий, в том числе горно-рудных и энергетических, характерно значительное негативное преобразование подземных вод [5].

Проведение горно-рудных работ всегда сопряжено с влиянием на прилегающий ландшафт и геоэкологическое состояние звеньев окружающей среды. При добыче полезных ископаемых на поверхность ежегодно извлекаются миллиарды тонн горных пород, что приводит к изменению геохимических процессов, усилению миграции химических элементов в сферах Земли и ухудшению качества природных вод, в том числе подземных [6-8]. Загрязненные стоки с горно-рудных предприятий представляют серьезную проблему для качества воды, с которой сталкиваются страны, разрабатывающие месторождения полезных ископаемых [9-11]. Гидрохимическая эволюция подземных вод происходит в результате нарушения природного гидродинамического и гидрохимического режима в прилегающих ландшафтах [12, 13]. Под гидрохимической эволюцией понимаются необратимые в условиях разработки месторождения гидрохимические преобразования и качественные изменения состава подземных вод в зоне влияния деятельности горно-рудного предприятия, возникающие из-за поступления загрязняющих веществ в процессе технологического цикла добычи и обогащения рудных минералов, а также растворения и выщелачивания вмещающих горных пород. По итогу этих преобразований происходят изменение соотношения главных ионов и повышение минерализации подземных вод [14]. Загрязненные рудничные воды становятся источником поступления высокотоксичных соединений в поверхностные воды территорий, прилегающих к горно-рудным предприятиям [15]. Загрязняющие вещества, накопленные в хвостохранилищах горно-обогатительных комбинатов, способны оказывать отрицательное воздействие на здоровье населения, в том числе детского [16, 17]. Актуальным аспектом влияния горнодобывающей промышленности на качество поверхностных и подземных вод является загрязнение соединениями азота, особенно нитратами [18] и сульфатами, вследствие окисления сульфидных минералов, входящих в состав рудных и второстепенных минералов разрабатываемых месторождений полезных ископаемых (угольных, медно-никелевых, свинцово-цинковых и т.д.) [12, 19, 20]. Для характеристики гидрохимической эволюции особо эффективен анализ гидрохимических и гидродинамических параметров подземных вод [21-23]. Гидрохимические методы, такие как соотношение главных ионов и изотопов элементов, математическая статистика, гидрохимическое моделирование, широко используются для анализа гидрохимической эволюции [24-26]. В гидрохимической эволюции подземных вод доминируют процессы выщелачивания и растворения минералов, ионный обмен и изменение параметров потока подземных вод [27, 28].

В горнодобывающей промышленности для обеспечения безопасности проведения работ необходим постоянный дренаж горных выработок, что неизбежно приводит к снижению уровня подземных вод [29, 30]. Уровенный режим на территории горно-рудных предприятий влияет на гидрохимический состав вод [31, 32]. Для выявления механизма гидрохимической эволюции, связанного с горнодобывающей деятельностью, необходимо проведение совместных гидрохимического и гидродинамического анализов, как в ранее проведенных исследованиях [18, 21, 28].

Целью работы является исследование динамики уровенного и гидрохимического режимов, а также гидрохимической эволюции подземных вод в зоне добычи апатит-нефелиновых руд в юго-восточной части Хибинского щелочного массива.

Методы

Изменения химического состава, уровня подземных вод рассматривались за период 2009-2023 гг. в наблюдательных скважинах 43 и 59, расположенных в карьере и около хвостохранилища обогатительной фабрики, оборудованных на водоносный комплекс палеозойских интрузий γPz, а также в наблюдательных скважинах 51 и 6э, расположенных около хвостохранилища и на водозаборе ГОК, оборудованных на водоносный верхнечетвертичный осташковский водно-ледниковый горизонт f,lgQ$_{III}$os (рис.1). Пробы подземных вод в скважинах отбирались сотрудниками АО «СЗФК» четыре раза в год – в конце зимы, в половодье, в летнюю межень, в начале зимнего периода. Замер уровней воды производился раз в неделю. В пробах определялись значения pH, содержания ионов HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^-, NO_2^-, F^-, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+ и микроэлементов Al, Fe, Mn, Sr, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Cd, Pb. Химический анализ подземных вод выполнялся в лаборатории Кольского геологического информационно-лабораторного центра (Апатиты), имеющей аттестат аккредитации.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 172-186
© В.А.Даувальтер, М.В.Даувальтер, З.И.Слуковский, 2025

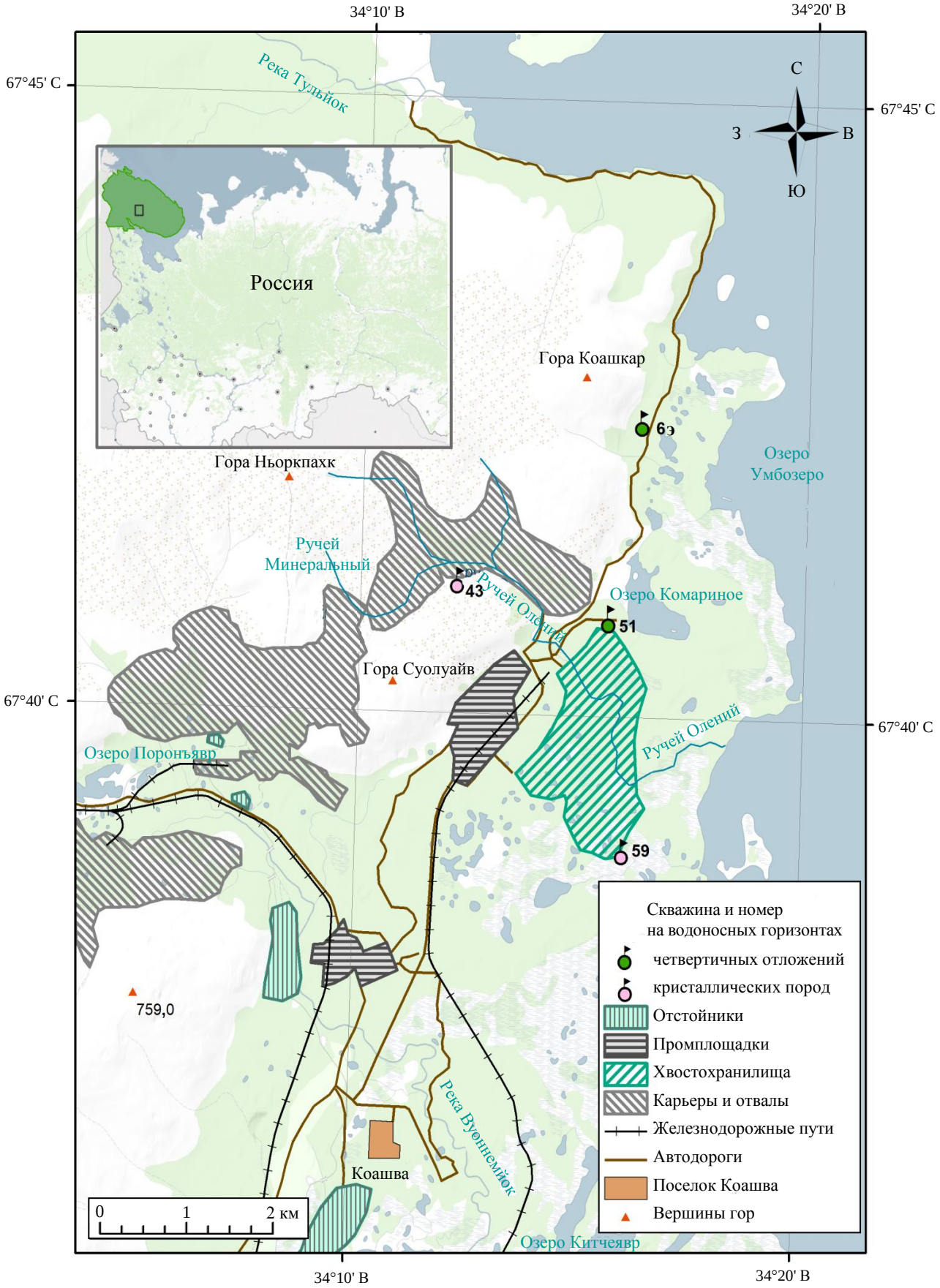


Рис.1. Карта-схема расположения промплощадки ГОК «Олений Ручей» и гидрогеологических скважин

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обсуждение результатов

Акционерное общество «СЗФК» производит разработку месторождения апатит-нефелиновых руд Олений Ручей с 2012 г., когда было завершено строительство первой очереди горно-обогатительного комбината, выполнены пусконаладочные работы обогатительной фабрики и получены первые тонны апатитового концентрата. Водозабор горно-обогатительного комбината (ГОК) «Олений Ручей» (рис.1, скв. 6э) расположен в 3 км на северо-восток от рудника, в 1 км на запад от берега Умбозера и снабжает водой административно-бытовой комплекс с 2012 г. Количество извлеченной из водоносного верхнечетвертичного осташковского водно-ледникового горизонта $f,lgQ_{III}os$ двумя эксплуатационными скважинами на водозаборе воды за последние 10 лет находится в диапазоне 220-260 тыс м^3/год (0,6-0,7 тыс м^3/сут). История освоения и результаты исследований поверхностных вод в зоне влияния разработки месторождения Олений Ручей описаны в публикациях авторов [33-35].

В геологическом строении месторождения Олений Ручей принимают участие интрузивные породы Хибинского щелочного массива и вмещающие ультраметаморфизованные и интрузивные образования архея, на большей части исследуемой территории перекрытые чехлом четвертичных отложений. Хибинский массив представляет собой сложную многофазную палеозойскую интрузию центрального типа. Контакты интрузивного массива с вмещающими породами вертикальные или крутопадающие (65-80°) к центру. Массив обладает автономной тектоникой, не сопряженной со структурой вмещающих пород, и в плане характеризуется кольцевым расположением слагающих интрузивных комплексов.

Преобладающие в Хибинском массиве породы – это нефелиновые сиениты, представленные хибинитами и фойяитами. Массивные и трахитоидные хибиниты, относящиеся к двум разным фазам внедрения, слагают внешние зоны Хибин, а арфведсонитовые трахитоидные и эгирин-арфведсонитовые трахитоидные фойяиты приурочены к внутренним частям. Кроме того, в строении массива участвуют эгириновые и гнейсовидные рисчорриты, занимающие второе место по распространению. На северо-восточном фланге месторождения Олений Ручей хибиниты прослеживаются вблизи контакта с фойяитами. Гнейсовидные рисчорриты и хибиниты пространственно приурочены к Эвеслогчоррской тектонической зоне смятия, проходящей через восточный фланг месторождения. Породы йиолит-уртитовой серии, с которыми пространственно и генетически связаны все известные апатит-нефелиновые месторождения Хибин, включая месторождение Олений Ручей, представлены уртитами полевошпатовыми, пегматоидными, массивными; йолитами трахитоидными и полевошпатовыми трахитоидными; малиньитами трахитоидными.

Четвертичные отложения в переделах изучаемого района, представленные ледниковыми ($g_{III}os$) и водно-ледниковыми ($f,lgQ_{III}os$) отложениями осташковского времени, развиты весьма широко в виде прерывистого чехла мощностью от 5 до 50 м, отсутствуют лишь на обрывистых склонах гор. Мощность четвертичных отложений заметно возрастает на участках холмисто-моренного, конечно-моренного и водно-ледникового рельефа.

В гидрогеологическом отношении месторождение Олений Ручей характеризуется хорошо расчлененным эрозионным рельефом, отчетливо выраженными водораздельными границами, неустойчивым сезонно изменяющимся уровенно-расходным режимом вод, сравнительно малой мощностью четвертичных отложений и неравномерной тектонической трещиноватостью кристаллических пород.

Разрез четвертичных и палеозойских водоносных пород представлен проницаемыми песчаными, гравийно-галечными ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями с тонкими прослоями пылеватой супеси и трещиноватыми породами нефелиновых сиенитов. Тесная связь режима подземных вод с атмосферными осадками определяет эти воды, как воды местного происхождения, у которых совпадают области питания и распространения. Базисами поверхностного и подземного стока служат ближайшие к месторождению озера, залегающие на различных уровнях. Разгрузка водоносных горизонтов четвертичных отложений и трещиноватых кристаллических пород осуществляется долинами ручьев Минеральный и Олений в приозерную низменность Умбозера (рис.2). Наиболее низкий урез воды в Умбозере достигает отметки 150 м. Ближайшее к месторождению Олений Ручей оз. Комариное имеет отметку водного зеркала 174 м. Амплитуда колебания уровня в течение года для грунтового водоносного горизонта четвертичных отложений составляет 15-30 м; для горизонта кристаллических пород – 20-30 м (в долинах ручьев), 40-90 м (на склонах гор).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. *2025. Т. 276. Вып. 1. С. 172-186*
© В.А.Даувальтер, М.В.Даувальтер, З.И.Слуковский, 2025

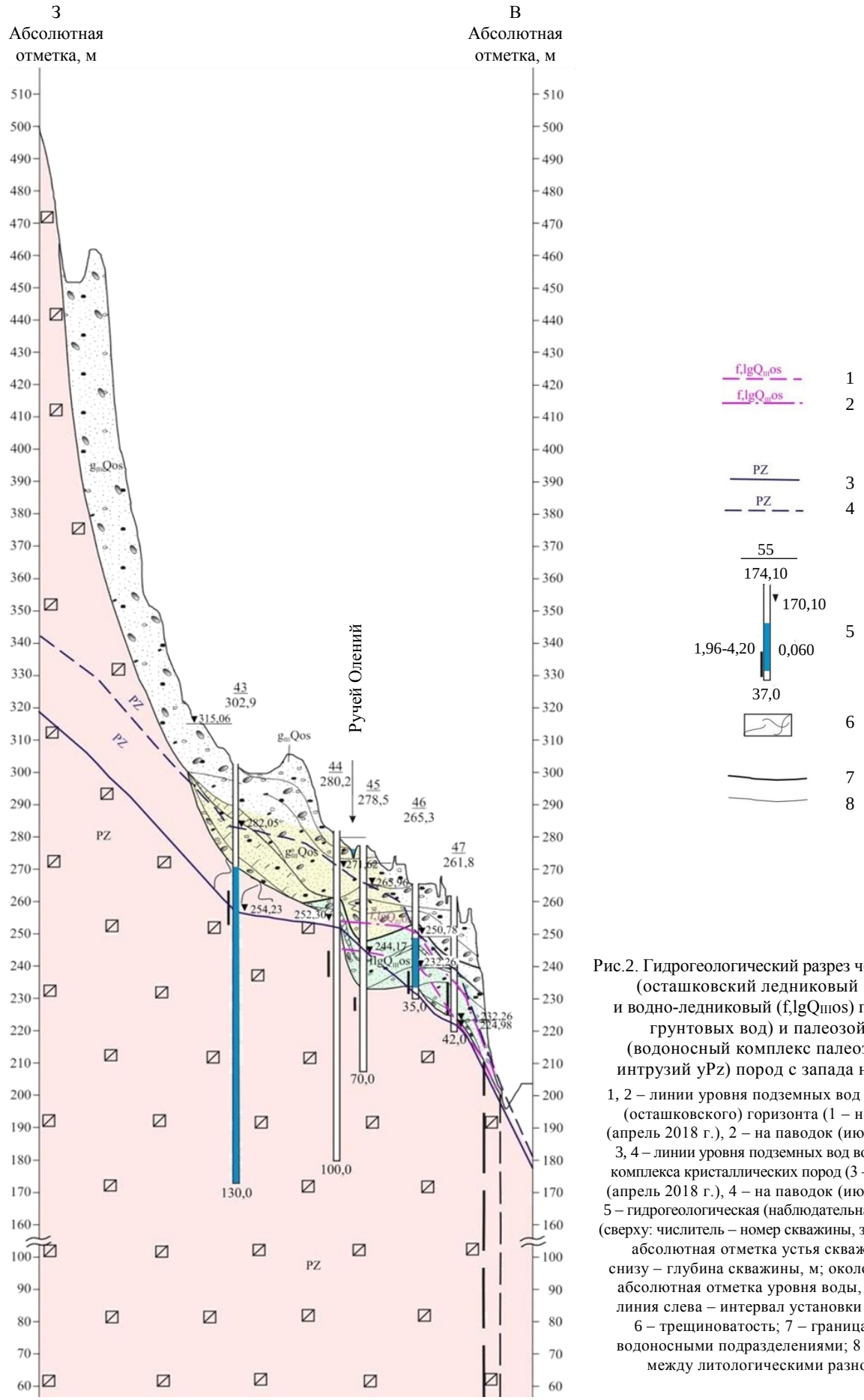


Рис.2. Гидрогеологический разрез четвертичных (осташковский ледниковый ($g_{III}os$) и водно-ледниковый ($f,lgQ_{III}os$) горизонты грунтовых вод) и палеозойских (водоносный комплекс палеозойских интрузий уPz) пород с запада на восток

1, 2 – линии уровня подземных вод грунтового (осташковского) горизонта (1 – на межень (апрель 2018 г.), 2 – на паводок (июнь 2018 г.); 3, 4 – линии уровня подземных вод водоносного комплекса кристаллических пород (3 – на межень (апрель 2018 г.), 4 – на паводок (июнь 2018 г.); 5 – гидрогеологическая (наблюдательная) скважина (сверху: числитель – номер скважины, знаменатель – абсолютная отметка устья скважины, м; снизу – глубина скважины, м; около стрелки – абсолютная отметка уровня воды, м; черная линия слева – интервал установки фильтра); 6 – трещиноватость; 7 – граница между водоносными подразделениями; 8 – граница между литологическими разностями

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Водоносный верхнечетвертичный осташковский водно-ледниковый горизонт грунтовых вод f,lgQ$_{III}$os и водоносный комплекс палеозойских интрузий γPz имеют гидравлическую связь между собой, с атмосферными осадками и поверхностными водами. Изменение уровней воды в скважинах происходит в соответствии с сезонами года и выпадением осадков. Во время снеготаяния и дождей уровень подземных вод резко поднимается, а в меженное зимнее и летнее время без осадков снижается (рис.3). В скважинах 43 и 6э за более чем десятилетнюю добычу апатит-нефелинового сырья установлено достоверное снижение среднегодовых уровней воды на 10 и 2 м соответственно, связанное с увеличением глубины карьера и сработкой уровня при откачке воды из карьера, а также при водозаборе подземных вод комплекса палеозойских интрузий и осташковского горизонта. В скважинах 43 и 6э прослеживаются наиболее четкие сезонные колебания и наибольшая амплитуда уровня подземных вод – до 40 и 7 м соответственно (рис.3). В скважинах 51 и 59 сезонные колебания не столь заметны (особенно в скв. 59), так как они находятся рядом с хвостохранилищем обогатительной фабрики, где уровень пульпы и сточных вод не подвержен значительным изменениям, а колебания не зависят от режима поверхностных вод.

Подземные воды Хибинского щелочного массива по химическому составу относятся к низкоминерализованным водам с нейтральными значениями pH, гидрокарбонатного класса и натриевой группы [36].

Скважина 43 пробурена в 2008 г., отбор проб воды производился еще до начала эксплуатации месторождения, поэтому результаты химического анализа пробы, отобранной в 2009 г., принимаются за фон (табл.1). В скв. 43, расположенной рядом с карьером и оборудованной на водоносный комплекс палеозойских интрузий γPz, до начала разработки месторождения (ноябрь 2009 г.) вода характеризовалась гидрокарбонатно-натриевым составом (рис.4, *а*), невысокой минерализацией (47 мг/л) и значением pH на границе между слабокислым и нейтральным (6,51). В настоящее время минерализация воды увеличилась в четыре раза до 186 мг/л, величина pH до 8,89, что соответствует щелочному значению. При добыче апатит-нефелиновых руд используют азотсодержащие взрывчатые вещества, которые, попадая в подземные воды, растворяются и увеличивают содержание азотсодержащих ионов, главным образом NO_3^-. Содержание нитратов в воде скв. 43 увеличилось более чем в 50 раз, превышая предельно допустимые концентрации (ПДК) – 45 мг/л, согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (табл.1). Увеличение содержания NO_3^- с начала разработки месторождения зафиксировано в воде всех скважин (рис.5). Графики динамики содержания NO_3^- в исследуемых скважинах аппроксимируются степенной зависимостью. До разработки месторождения основным источником соединений азотной группы были поверхностные воды с небольшими (десятые доли мг/л) содержаниями [33]. После начала деятельности рудника растворимые формы соединений азота (главным образом NO_3^-) взрывчатых веществ стали поступать в подземные воды в больших количествах, увеличиваясь. Это связано с ростом добычи апатит-нефелиновой руды и увеличением массы применяемых взрывчатых веществ.

Нитрат-ион, как и другие минеральные соединения азота, является хорошо растворимым в воде, и его чрезвычайно трудно удалить из рудничных сточных вод с помощью сорбционных фильтров, в отличие, например, от соединений тяжелых металлов. Для удаления нитрат-иона применяются относительно молодые, но крайне перспективные методы биологической очистки [37]. Их суть заключается в использовании микроорганизмов для очистки воды от нежелательных компонентов. Загрязнители (нитрат-ион), которые необходимо удалить, выступают в роли питательного субстрата для жизнедеятельности микроорганизмов. Разработана технология CW (Constructed wetlands – искусственно созданные водно-болотные угодья), которая заключается в сооружении бассейнов произвольной формы с расположенной внутри фильтрующей загрузкой из различных субстратов, в их роли могут выступать песок и щебень. В фильтрующую загрузку высаживают водные

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 172-186
© В.А.Даувальтер, М.В.Даувальтер, З.И.Слуковский, 2025

растения, в корневой части которых находятся микроорганизмы. Растения могут покрывать водоем целиком или только определенную часть. Загрязненная вода в процессе прохождения через заросли, корневой слой, загрузку из песка и щебня, очищается до нормативных показателей без негативного воздействия на окружающую среду.

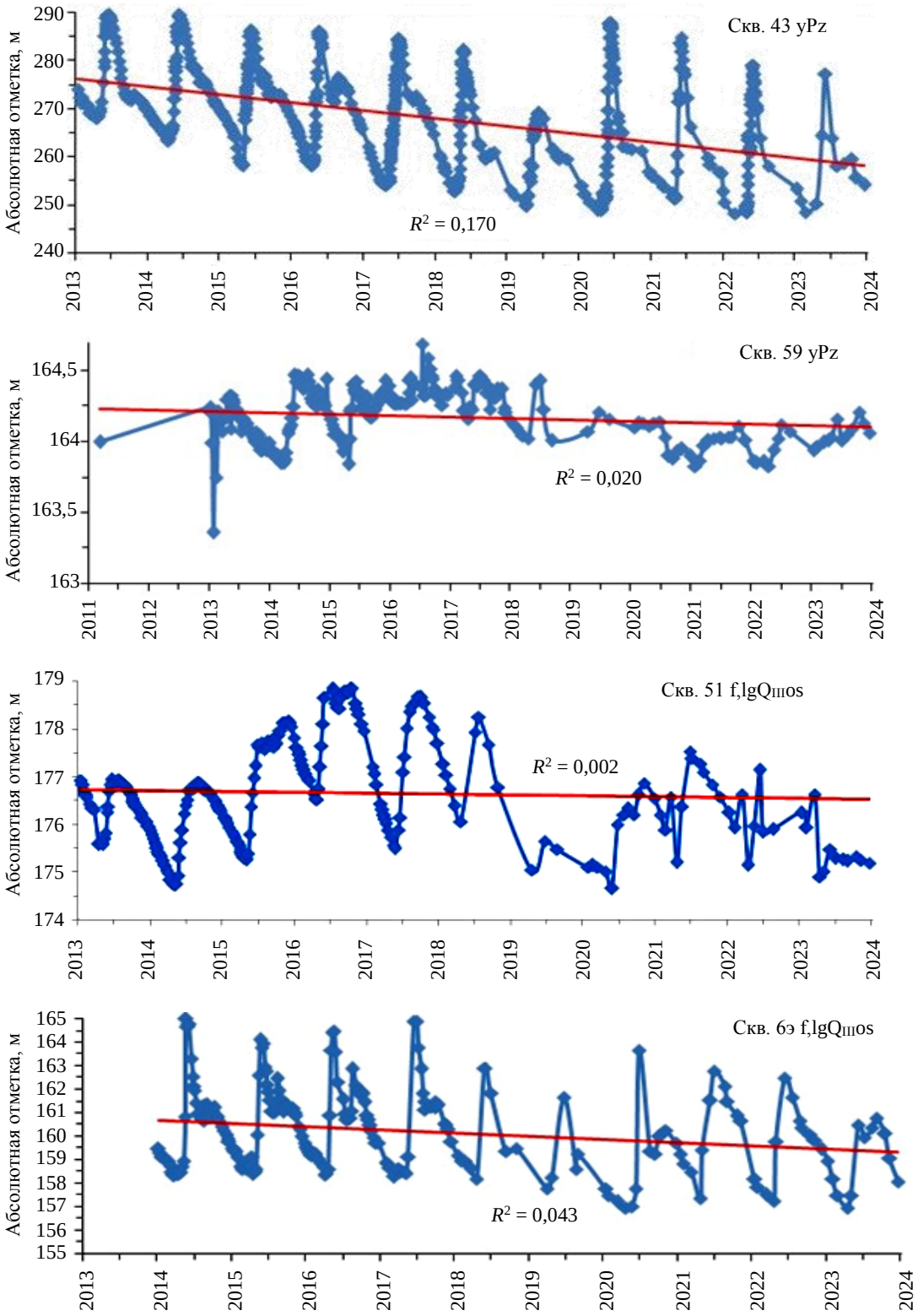


Рис.3. Динамика уровней воды в гидрогеологических скважинах за период деятельности ГОК «Олений Ручей»

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 1

Значения уровня воды, величины pH, содержания главных ионов и минерализации М в скв. 43 ГОК «Олений Ручей» за период 2009-2020 гг.

Дата	Уровень, м	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	М, мг/л
13.11.09	272,37	6,51	2,6	0,24	8,6	2,9	26,8	4,9	0,18	1,1	47
28.03.13	268,90	9,10	4,0	0,48	9,4	3,1	22,6	4,9	0,18	12,2	57
09.04.14	263,72	8,90	5,8	0,24	12,2	3,8	23,8	4,5	1,33	18,3	70
17.06.14	289,38	8,84	14,0	0,73	16,9	5,7	21,4	29,8	1,77	35,6	126
27.08.14	278,77	9,07	12,0	1,45	15,3	5,6	20,7	31,4	1,90	27,5	116
23.10.14	275,33	6,22	12,2	0,48	16,0	7,1	24,4	31,9	2,16	23,4	118
02.04.15	261,97	8,05	4,6	0,36	7,5	2,2	25,6	2,8	2,13	6,9	52
16.06.15	285,93	5,50	18,4	0,97	20,7	7,5	22,0	38,1	2,67	52,4	163
20.08.15	276,64	9,15	21,2	0,97	21,5	9,9	17,1	53,7	2,54	46,2	173
29.10.15	272,69	8,69	10,8	0,36	14,2	4,8	21,4	25,0	1,79	19,6	98
07.04.16	258,64	6,40	9,8	0,48	14,4	4,7	37,2	5,2	2,40	28,7	103
06.07.16	274,69	8,61	12,2	0,61	16,6	5,5	21,4	24,1	2,25	35,1	118
01.09.16	276,38	5,75	19,2	0,48	18,8	6,6	21,4	36,9	2,72	46,5	152
26.10.16	273,36	9,12	11,8	0,48	16,3	5,7	23,2	26,3	2,00	28,4	114
22.06.17	278,75	9,05	12,2	0,85	16,2	5,5	37,8	9,2	2,41	33,7	118
01.11.17	269,92	8,94	7,2	0,36	12,0	4,2	36,6	6,3	2,06	10,8	80
13.09.18	259,53	8,91	19,2	1,94	19,6	7,0	64,7	10,7	2,97	43,3	169
01.11.18	261,02	8,74	18,2	1,57	21,0	7,4	68,3	9,4	2,57	39,0	167
27.06.19	268,21	8,83	17,2	0,12	18,7	6,4	47,6	6,6	2,90	49,6	149
29.08.19	261,48	8,89	22,6	0,97	22,4	7,5	63,4	10,3	3,10	55,6	186
25.06.20	281,27	8,81	9,8	0,48	15,9	5,0	42,7	10,6	2,00	20,7	107
20.08.20	262,24	8,72	13,0	1,45	17,1	5,3	40,9	11,9	2,20	37,9	130

Источником поступления Ca^{2+} в подземные воды является выветривание основного рудного минерала, фторапатита ($Ca_5(PO_4)_3F$), а ионов щелочных металлов Na^+ и K^+ – другой рудный минерал – нефелин (Na, K)$AlSiO_4$. В апатит-нефелиновых породах встречаются разновидности апатита – карбонат-фторапатит $Ca_5[PO_4,CO_3(OH)]_3F$, хлорапатит ($Ca_5(PO_4)_3Cl$) и стронциоапатит $Sr_3Ca_2[PO_4]_3F$ [35]. Сульфидные минералы, содержащиеся в рудных телах месторождения Олений Ручей, например сфалерит ZnS, халькопирит $CuFeS_2$, халькозин Cu_2S и др., являются источником поступления ионов SO_4^{2-} в поверхностные и подземные воды [35]. Поэтому в процессе выветривания и выщелачивания этих минералов в повышенных содержаниях в воду поступают главные ионы. 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. В результате гидрохимической эволюции по преобладающим ионам вода стала гидрокарбонатно-кальциевой, на втором месте среди анионов стоит NO_3^-, а среди катионов – Na^+ (см. рис.4, *б*).

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 [33]. В пробах подземных вод, отобранных из скв. 43 до начала разработки месторождения Олений Ручей, соотношения между главными ионами были выше – 4,3; 89 и 0,33 соответственно, что связано с большим временем контакта с горными породами, а также большим влиянием процессов выщелачивания и растворения на формирование химического состава подземных вод по сравнению с поверхностными. В настоящее время соотношения между главными ионами в воде скв. 43 равны 4,9; 12; 1,04, что также говорит о большом участии выщелачивания, растворения разновидностей апатита и примесей в формировании химического состава подземных вод после начала разработки месторождения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.А.Даувальтер, М.В.Даувальтер, З.И.Слуковский, 2025

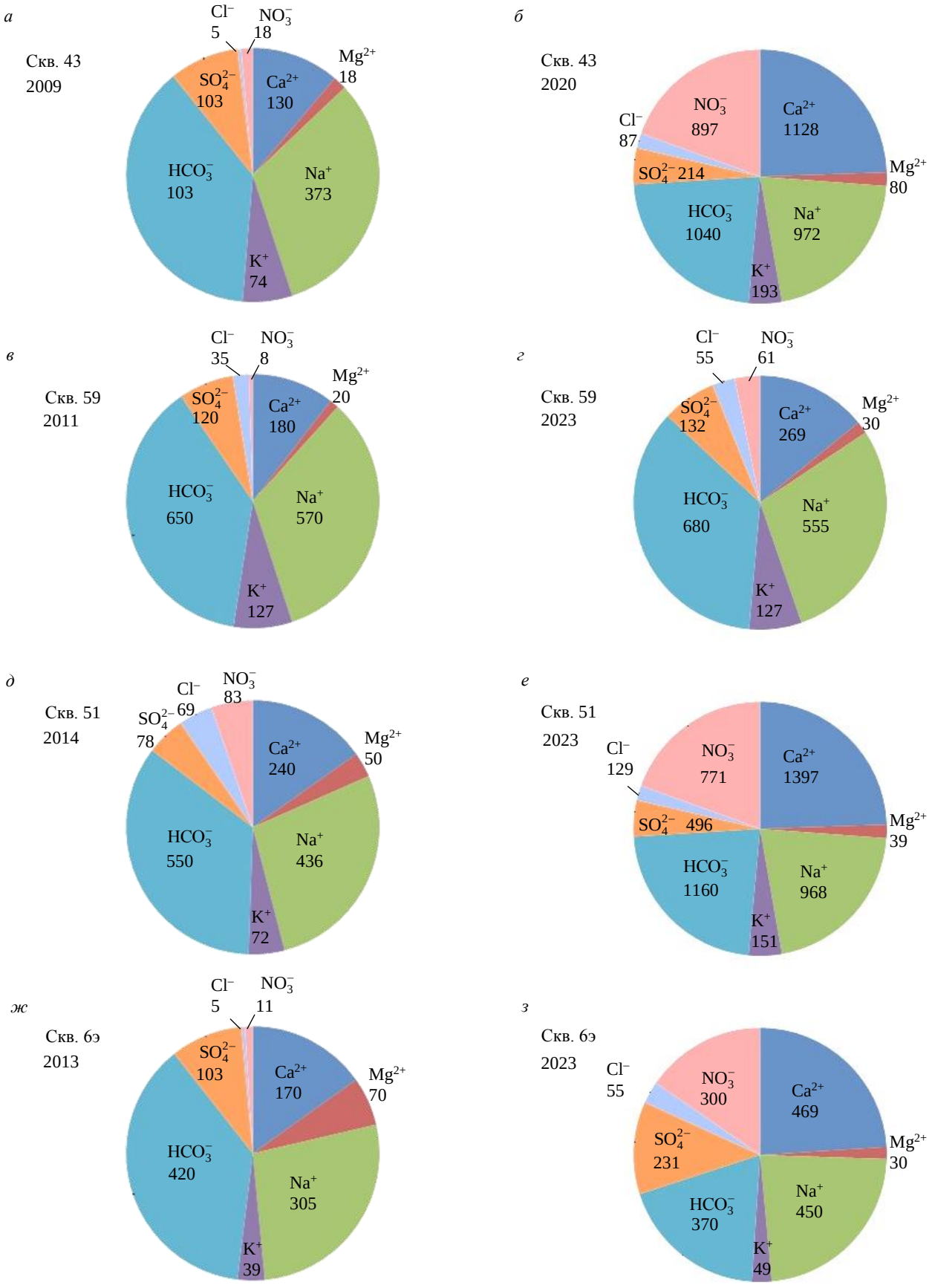


Рис.4. Динамика эквивалентных концентраций (мкг-экв/л) главных ионов в подземных водах за период деятельности ГОК «Олений Ручей»

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

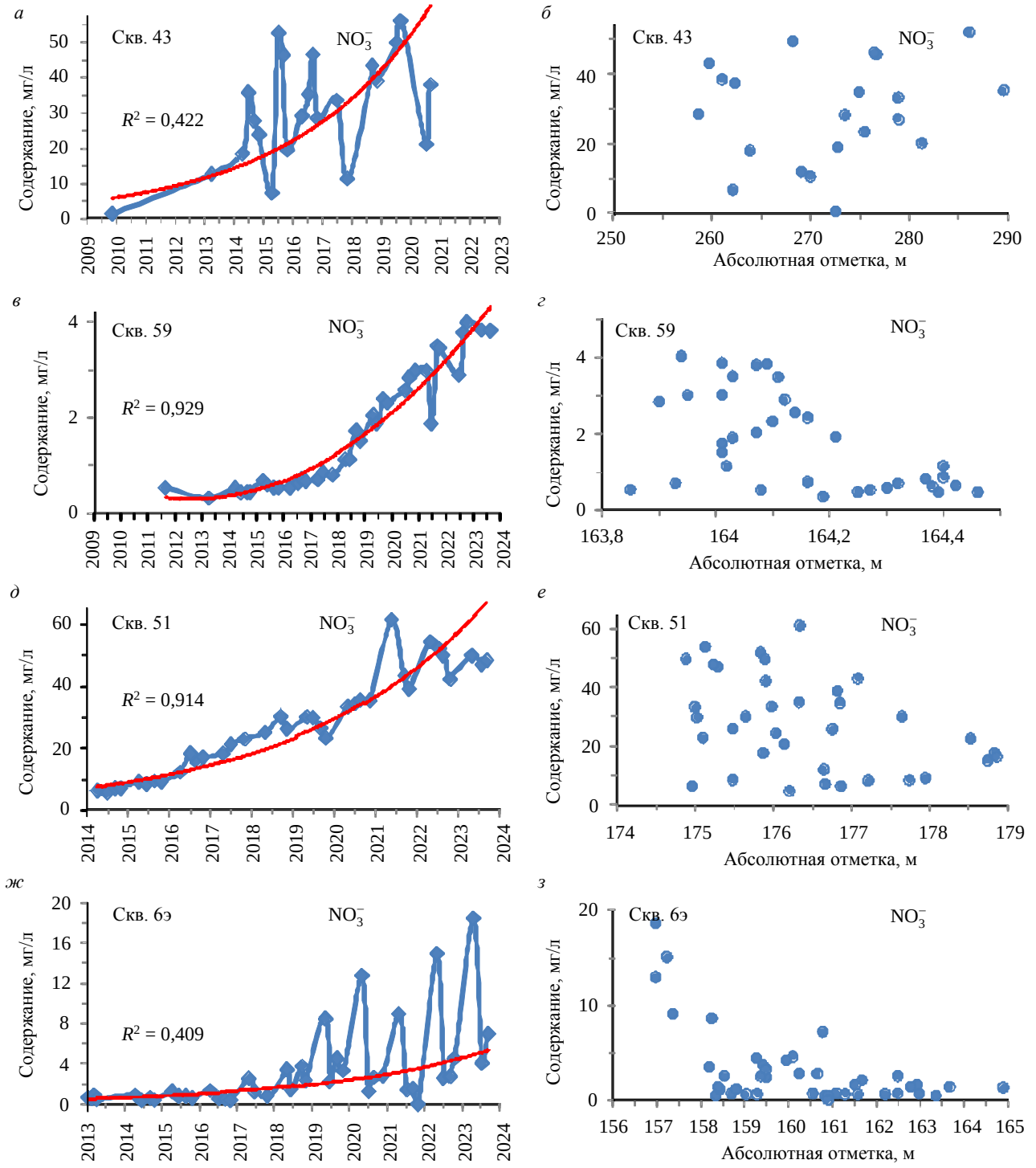


Рис.5. Динамика (*а*, *в*, *д*, *ж*) и зависимость содержания нитратов от уровня воды (*б*, *г*, *е*, *з*) в исследуемых скважинах

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 [35]. Отношения эквивалентных концентраций главных ионов $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ равны 1,9 и 1,4; $[HCO_3^-]/[Cl^-]$ – 8,7 и 9,4; $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^+ + K^+]$ – 0,19 и 0,60 в водах подземного рудника и карьера соответственно. Это свидетельствует уже о большем участии процессов выщелачивания и растворения нефелина и сульфидов при образовании сточных вод горно-рудного предприятия.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

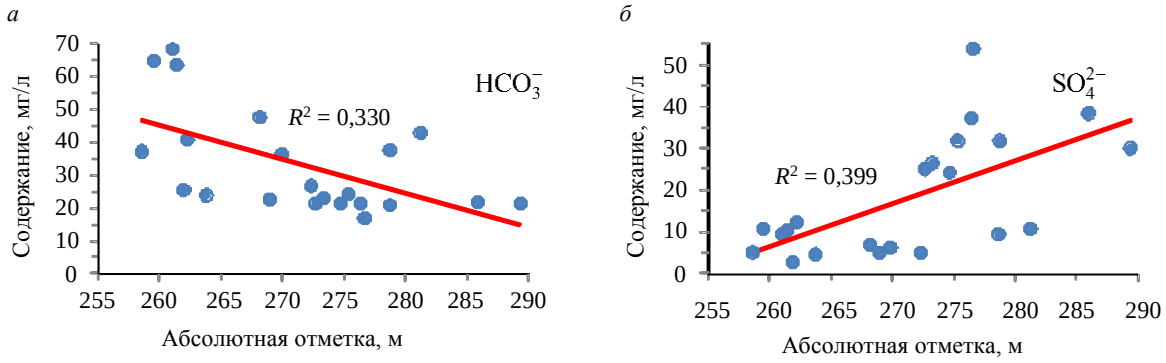


Рис.6. Зависимость содержания гидрокарбонатов и сульфатов от уровня воды в скважине 43

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 [35]. 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, что говорит о еще большем участии 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 зафиксированы для анионов HCO_3^- и SO_4^{2-} (рис.6). При повышении уровня воды в водоносном горизонте за счет инфильтрации растаявшего снега и выпавших атмосферных осадков, содержащих незначительные концентрации гидрокарбонатов, происходит снижение содержания анионов за счет разбавления. Для сульфатов, возможно, работает другой механизм. При понижении уровня подземных вод в зоне аэрации происходит окисление сульфидных минералов до сульфатов при наличии пленочной воды, кислорода, активном участии серобактерий, и при повышении уровня содержание образовавшихся сульфатов увеличивается.

Из двух скважин, расположенных около хвостохранилища обогатительной фабрики, наибольшие преобразования химического состава произошли в скв. 51, оборудованной на осташковский водно-ледниковый горизонт грунтовых вод f,lgQ$_{III}$os (табл.2). В этой скважине отмечаются более заметные сезонные колебания, чем в скв. 59 (см. рис.3). За годы работы обогатительной фабрики минерализация воды увеличилась более чем в три раза (с 63 до 203 мг/л), содержание нитратов – на порядок (до 48 мг/л в 2023 г., что больше величины ПДК воды питьевого назначения 45 мг/л, согласно СанПиН 1.2.3685-21), Ca^{2+} – в шесть раз, Sr – на порядок, а вода, как и в скв. 43, стала гидрокарбонатно-кальциевой по составу со значительной долей нитратов и натрия. Скважина находится недалеко от оз. Комариное, которое в настоящее время выполняет роль отстойника ГОК «Олений Ручей». Вода озера за время работы ГОК претерпела значительные качественные изменения и по содержанию главных ионов близка к воде из скв. 51, что говорит об их вероятной гидравлической связи [35]. Вода оз. Комариное гидрокарбонатно-натриевая, но Ca^{2+} практически вплотную приблизился к 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 $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^+ + K^+]$ в скв. 51 и оз. Комариное равно 1,28 и 0,83, а $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ – 2,3 и 1,2, что свидетельствует о большем обогащении продуктами растворения и выщелачивания минералов, входящих в состав горных пород разрабатываемого месторождения, в воде скв. 51, чем в оз. Комариное. Большая минерализация воды скв. 51 по сравнению с оз. Комариное (153 мг/л) подтверждает это предположение. В оз. Комариное также поступают менее минерализованные воды поверхностного стока с незначительным периодом контакта с горными породами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Средние (в числителе), минимальные и максимальные (в знаменателе) значения величины pH, содержания главных ионов и минерализации М в воде скважин ГОК «Олений Ручей» за период наблюдений 2009-2023 гг.

Скважина	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	М, мг/л
43	8,22 5,5-9,15	12,6 2,6-22,6	0,73 0,12-1,9	16,0 7,5-22,4	5,6 2,2-9,9	33,2 17,1-68	17,9 2,8-54	2,1 0,2-3,1	30,6 1,1-56	119 47-186
59	8,41 6,26-9,2	4,5 2,6-8,6	0,65 0,12-1,9	12,6 10,7-14	5,2 4,6-6,0	43,3 37,2-48	5,2 3,3-9,5	1,9 0,2-5,2	1,7 0,3-4,0	75 68-84
51	7,59 6,07-8,5	18,3 4,6-43,2	1,48 0,24-3,6	19,3 9,4-37,8	5,4 2,7-10,2	61,9 31,7-112	21,0 2,9-82,1	3,9 1,8-6,7	27,6 5,2-61,1	159 61-304
6э	7,97 5,65-8,6	4,3 2,8-9,4	0,59 0,12-1,7	7,8 6,4-11,7	1,6 1,1-2,7	25,6 18,3-31	4,1 0,5-11,1	1,5 0,2-3,0	3,2 0,1-18,6	49 39-76

В скважине 59, оборудованной на водоносный комплекс палеозойских интрузий yPz, не произошло заметных изменений химического состава воды, сохраняется природное соотношение главных ионов, среда остается гидрокарбонатно-натриевой, только увеличилось содержание нитратов (с 0,5 до 3,8 мг/л). Минерализация, а вместе с ней и содержание главных ионов, увеличились незначительно – с 69 до 77 мг/л. Меньшая гидравлическая связь палеозойского водоносного комплекса с водами хвостохранилища, по сравнению с водно-ледниковым горизонтом грунтовых вод в скв. 51, вероятно связана с меньшей трещиноватостью коренных пород в южной части хвостохранилища. Это подтверждается подобным соотношением главных ионов в воде скв. 43, отобранной до начала разработки в 2009 г., и воде скв. 59, отобранной в 2023 г.: $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^{+} + K^{+}]$ – 0,33 и 0,44; $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ – 4,3 и 5,2 соответственно (см. рис.4, *а, г*), а также незначительными колебаниями уровня воды в скв. 59 по сравнению со скв. 51 (см. рис.3).

Вода наблюдательной скважины на подземном водозаборе 6э первоначального гидрокарбонатно-натриевого состава за годы деятельности ГОК «Олений Ручей» преобразовалась в гидрокарбонатно-кальциевую со значительной долей NO_3^- и Na^{+}, которые немного меньше по содержанию превалирующих ионов (370 и 300 мкг-экв/л – HCO_3^- и NO_3^-; 470 и 450 мкг-экв/л – Ca^{2+} и Na^{+}). Содержание хлоридов увеличилось на порядок – с 0,18 до 2,0 мг/л, содержание сульфатов – более чем в два раза, а минерализация воды – почти в два раза (с 44 до 76 мг/л). До начала деятельности ГОК «Олений Ручей» химический состав воды в скв. 6э был подобен составу недалеко расположенного ручья Теплый (с минерализацией 40 мг/л), в который не поступают прямые стоки комбината [35]. Отношение эквивалентных концентраций $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ в скв. 6э и ручье Теплый было равно 4,1 и 5,3, а $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^{+} + K^{+}]$ – 0,70 и 0,45. В настоящее время, спустя десятилетие разработки месторождения Олений Ручей, увеличилась доля SO_4^{2-} и Ca^{2+}, а соотношения $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ и $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[Na^{+} + K^{+}]$ стали 1,6 и 1,0. Это говорит об увеличении доли загрязненных рудничных вод в питании подземных вод осташковского водно-ледникового горизонта. В скв. 6э установлена тенденция снижения содержания главных ионов (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+} и Na^{+}), а также минерализации, Sr и NO_3^- с повышением уровня воды (рис.7 и 5, *з*). Значения коэффициента корреляции между гидрохимическими показателями (за исключением Sr) и уровнем воды в скв. 6э больше критического ($r > 0,39$ при уровне значимости $\alpha = 0,01$ и выборке $n = 42$) и находятся в диапазоне от –0,51 до –0,69. Во время снижения уровня к скважине подтягиваются загрязненные рудничные воды, а в период таяния снега и выпадения дождей происходит разбавление низкоминерализованными водами за счет инфильтрации атмосферных осадков в первый от поверхности водоносный горизонт. Об увеличении роли рудничных вод в формировании химического состава подземных вод в скв. 6э свидетельствует также увеличение доли нитратов – соотношение между $[HCO_3^-/NO_3^-]$ за десять лет разработки месторождения уменьшилось с 37 до 1,2 (см. рис.4, *ж, з*).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

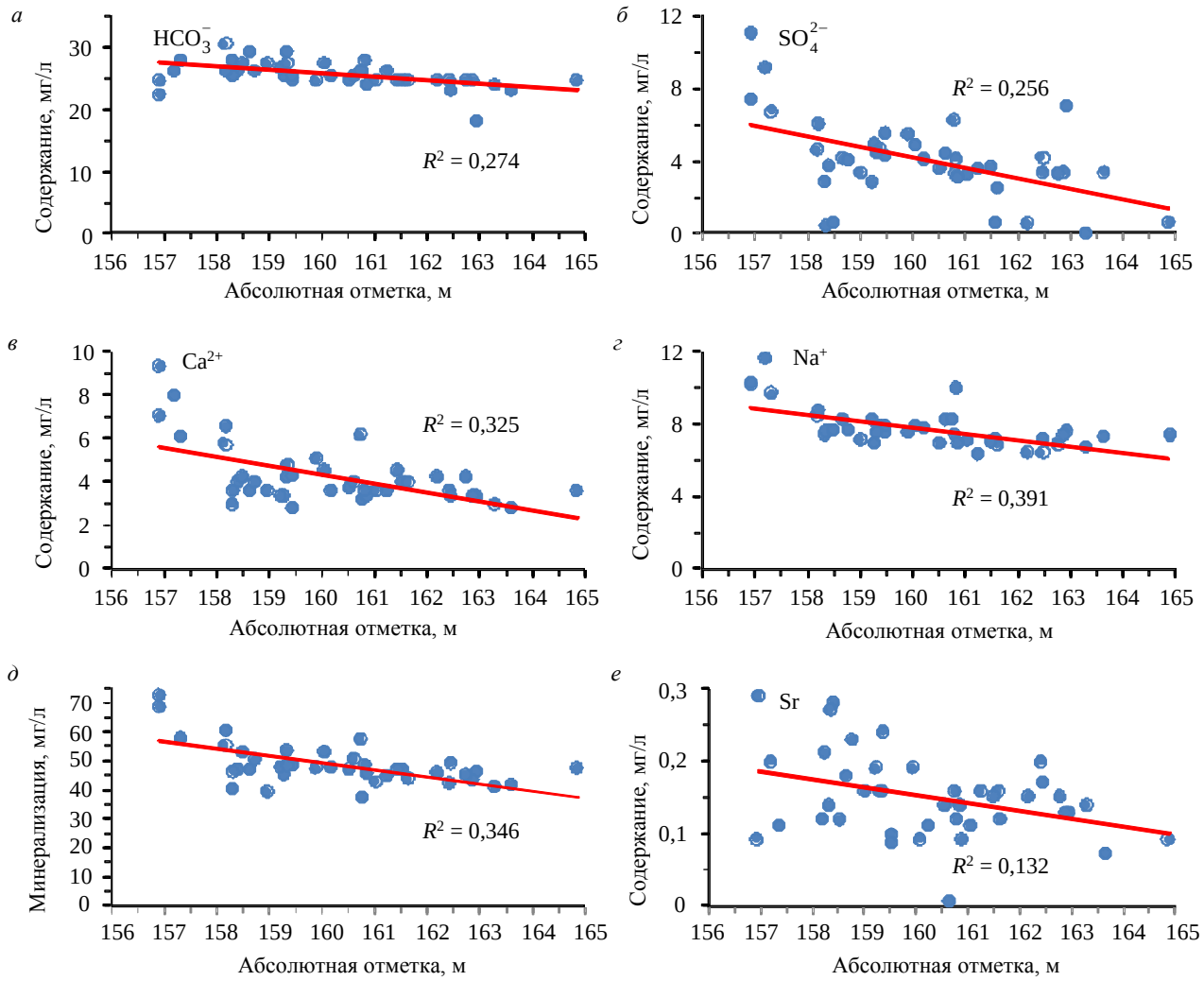


Рис.7. Зависимость главных ионов (*а*, *б*, *в*, *г*), минерализации (*д*) и стронция (*е*) от уровня воды в скважине 6э

Исследуемые микроэлементы не показали значительных сезонных или годовых изменений и зависимостей содержания от уровня подземных вод, а концентрации многих оказались ниже пределов определения аналитическими приборами, поэтому в данной работе они не обсуждаются.

Заключение

В результате исследований химического состава и уровней подземных вод в наблюдательных скважинах на территории деятельности апатит-нефелинового рудника «Олений Ручей» установлена гидрохимическая эволюция подземных вод. В настоящее время, спустя десятилетие разработки месторождения Олений Ручей, изменилось качество подземных вод и соотношение главных ионов, увеличилась минерализация. Состав вод в основном контролируется выветриванием и выщелачиванием главных рудных минералов: апатита и его разновидностей, нефелина, сульфидных минералов, а также использованием взрывчатых веществ, содержащих азотные соединения, и изменением уровней подземных вод в результате увеличения глубины горных выработок, откачки подземных вод для водоснабжения рудника. Рост гидрохимических показателей (минерализация, величина pH и содержание главных ионов) в результате десятилетних исследований отмечается непосредственно в пределах проведения горных работ на руднике «Олений Ручей» и на расстоянии первых километров (карьер, хвостохранилище, водозабор). Необходимо дальнейшее изучение химического состава и уровенного режима подземных вод как в зоне влияния деятельности горнорудного предприятия на наблюдательных скважинах, по которым приводятся результаты в данной статье, так и на удалении, для установления границ распространения и динамики гидрохимической эволюции подземных вод. Например, на Коашвинском водозаборе, расположенном около

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

пос. Коашва (7 км от ГОК «Олений Ручей» и в 5 км от Восточного рудника АО «Апатит») и эксплуатирующем с 1978 г. осташковский водно-ледниковый горизонт грунтовых вод f,lgQ$_{III}$os. Подземные воды Коашвинского водозабора по качеству соответствуют нормам вод хозяйственно-питьевого водоснабжения с диапазоном минерализации от 30 до 190 мг/л в зависимости от сезонов года. Нефелиновые сиениты Хибинского щелочного массива характеризуются большим количеством минералов с высоким содержанием микроэлементов (Rb, Sr, других щелочных и щелочноземельных металлов, F, Mo, других тяжелых металлов в составе сульфидов, редкоземельных элементов, Ti, Nb, Ta), поэтому для детальных исследований гидрохимической эволюции подземных вод в зоне влияния апатит-нефелиновых горно-рудных предприятий необходимо определение содержания микроэлементов точными аналитическими приборами, например масс-спектрометрометрами с индуктивно-связанной плазмой, которые есть в приборной аналитической базе Федерального исследовательского центра КНЦ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пашкевич Н.В., Головина Е.И.* Актуальные проблемы управления добычей подземных вод на территории Российской Федерации // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 99-107.

2. *Bierkens M.F.P., Wada Y.* Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review // Environmental Research Letter. 2019. Vol. 14. № 6. № 063002. DOI: 10.1088/1748-9326/ab1a5f

3. *Tarasenko I., Kholodov A., Zinkov A., Chekryzhov I.* Chemical composition of groundwater in abandoned coal mines: Evidence of hydrogeochemical evolution // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 137. № 105210. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105210

4. *Головина Е.И., Гребнева А.В.* Управление ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Российской Федерации и Эстонской Республики) // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 788-800. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.2

5. *Ерзова В.А., Румынин В.Г., Никуленков А.М. и др.* Прогноз миграции радионуклидов в подземных водах в зоне влияния строительного дренажа Ленинградской АЭС-2 // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 194-211. DOI: 10.31897/PMI.2022.27

6. *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. DOI: 10.31897/PMI.2023.24

7. *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. DOI: 10.31897/PMI.2023.32

8. *Плюснин А.М., Воронина Ю.С., Украинцев А.В. и др.* Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд // Геохимия. 2023. Т. 68. № 12. С. 1295-1311. DOI: 10.31857/S0016752523110092

9. *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. DOI: 10.31897/PMI.2023.35

10. *Chunlu Jiang, Ming Li, Chang Li et al.* Combining hydrochemistry and ^{13}C analysis to reveal the sources and contributions of dissolved inorganic carbon in the groundwater of coal mining areas, in East China // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. Iss. 10. P. 7065-7080. DOI: 10.1007/s10653-023-01726-1

11. *Fengxia Liu, Guangcai Wang, Xiangyang Liang et al.* Temporal variation of groundwater hydrochemistry and water stable isotopes under long-term mining disturbance in a coal mine, northwest China // Applied Geochemistry. 2023. Vol. 158. № 105802. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2023.105802

12. *Di Chen, Qiyan Feng, Min Gong.* Contamination Characteristics and Source Identification of Groundwater in Xishan Coal Mining Area of Taiyuan Based on Hydrochemistry and Sulfur–Oxygen Isotopes // Water. 2023. Vol. 15. Iss. 6. № 1169. DOI: 10.3390/w15061169

13. *Shen Qu, Guangcai Wang, Zheming Shi et al.* Impact of Mining Activities on Groundwater Level, Hydrochemistry, and Aquifer Parameters in a Coalfield's Overburden Aquifer // Mine Water and the Environment. 2022. Vol. 41. Iss. 3. P. 640-653. DOI: 10.1007/s10230-022-00875-6

14. *Yanan Li, Qianqian Wang, Chunlu Jiang et al.* 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. Vol. 158. № 111352. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111352

15. *Shaji E., Sarath K.V., Santosh M. et al.* Fluoride contamination in groundwater: A global review of the status, processes, challenges, and remedial measures // Geoscience Frontiers. 2024. Vol. 15. Iss. 2. № 101734. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101734

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. Vol. 44. Iss. 12. P. 4557-4568. DOI: 10.1007/s10653-022-01221-z

17. *Qifa Sun, Guohui Lang, Tao Liu et al.* Health risk analysis of nitrate in groundwater in Shanxi Province, China: A case study of the Datong Basin // Journal of Water and Health. 2024. Vol. 22. Iss. 4. P. 701-716. DOI: 10.2166/wh.2024.320

18. *Obasi P.N., Okolo C.M., Edene E.N.* Hydrochemistry and structural control of groundwater flow in the mining areas of Abakaliki, southeast Nigeria // Sustainable Water Resources Management. 2023. Vol. 9. Iss. 1. № 32. DOI: 10.1007/s40899-022-00798-8

19. *Mykrä H., Aroviita J., Tolonen K. et al.* Detecting mining impacts on freshwater ecosystems using replicated sampling before and after the impact // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. Iss. 7. № 635. DOI: 10.1007/s10661-024-12812-x

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

20. *Chen Li, Herong Gui, Yan Guo et al.* Study on the Influence of Mining Activities on the Quality of Deep Karst Groundwater Based on Multivariate Statistical Analysis and Hydrochemical Analysis // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Iss. 24. № 17042. DOI: 10.3390/ijerph192417042

21. *Yong Xiao, Jingli Shao, Frape S.K. et al.* Groundwater origin, flow regime and geochemical evolution in arid endorheic watersheds: a case study from the Qaidam Basin, northwestern China // Hydrology and Earth System Sciences. 2018. Vol. 22. Iss. 8. P. 4381-4400. DOI: 10.5194/hess-22-4381-2018

22. *Liang Guo, Guangcai Wang, Yizhi Sheng et al.* Groundwater microbial communities and their connection to hydrochemical environment in Golmud, Northwest China // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 695. № 133848. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133848

23. *Nuan Yang, Pengpeng Zhou, Guangcai Wang et al.* Hydrochemical and isotopic interpretation of interactions between surface water and groundwater in Delingha, Northwest China // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 598. № 126243. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126243

24. *Haitao Zhang, Guangquan Xu, Hongbin Zhan et al.* Identification of hydrogeochemical processes and transport paths of a multi-aquifer system in closed mining regions // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 589. № 125344. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125344

25. *Xiaobo Zhang, Xue Li, Xubo Gao.* Hydrochemistry and coal mining activity induced karst water quality degradation in the Niangziguan karst water system, China // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. Iss. 7. P. 6286-6299. DOI: 10.1007/s11356-015-5838-z

26. *Shen Qu, Guangcai Wang, Zheming Shi et al.* Using stable isotopes (δD, $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$) to identify sources of water in abandoned mines in the Fengfeng coal mining district, northern China // Hydrogeology Journal. 2018. Vol. 26. Iss. 5. P. 1443-1453. DOI: 10.1007/s10040-018-1803-5

27. *Yan Guo, Jiuchuan Wei, Herong Gui et al.* Evaluation of changes in groundwater quality caused by a water inrush event in Taoyuan coal mine, China // Environmental Earth Sciences. 2020. Vol. 79. Iss. 24. № 528. DOI: 10.1007/s12665-020-09243-5

28. *Shen Qu, Fu Liao, Guangcai Wang et al.* Hydrochemical evolution of groundwater in overburden aquifers under the influence of mining activity: combining hydrochemistry and groundwater dynamics analysis // Environmental Earth Sciences. 2023. Vol. 82. Iss. 6. № 135. DOI: 10.1007/s12665-023-10817-2

29. *David K., Timms W.A., Barbour S.L., Mitra R.* Tracking changes in the specific storage of overburden rock during longwall coal mining // Journal of Hydrology. 2017. Vol. 553. P. 304-320. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.07.057

30. *Post D.A., Crosbie R.S., Viney N.R. et al.* Impacts of coal mining and coal seam gas extraction on groundwater and surface water // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 591. № 125281. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125281

31. *Pu Liu, Hoth N., Drebenstedt C. et al.* Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions – Using multivariate statistics and geochemical modeling approaches // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 601-602. P. 1-14. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.146

32. *Ge Zhu, Xiong Wu, Jianping Ge et al.* Influence of mining activities on groundwater hydrochemistry and heavy metal migration using a self-organizing map (SOM) // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 257. № 120664. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120664

33. *Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Дину М.И., Слуковский З.И.* Биогеохимические особенности функционирования малых арктических озер Хибинского горного массива в условиях изменения климата и окружающей среды // Геохимия. 2022. Т. 67. № 6. С. 559-575. DOI: 10.31857/S0016752522050053

34. *Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б. и др.* Эколого-геохимическая оценка снежного покрова в районе воздействия апатит-нефелинового производства Кольского полуострова // Геохимия. 2023. Т. 68. № 12. С. 1312-1328. DOI: 10.31857/S0016752523120026

35. *Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б. и др.* Геохимическая модификация поверхностных вод Хибинского горного массива с начала деятельности нового горнодобывающего предприятия // Геохимия. 2024. Т. 69. № 5. С. 477-494. DOI: 10.31857/S0016752524050057

36. *Даувальтер В.А., Даувальтер М.В.* Экологическое состояние подземных вод Восточного рудника АО «Апатит» // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 131-135. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.027

37. *Mo Wang, Dong Qing Zhang, Jian Wen Dong, Soon Keat Tan.* Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate – A review // Journal of Environmental Sciences. 2017. Vol. 57. P. 293-311. DOI: 10.1016/j.jes.2016.12.019

Авторы: **Владимир Андреевич Даувальтер,** *д-р геогр. наук, главный научный сотрудник* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *v.dauvalter@ksc.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-0372-5088*, **Маргарита Васильевна Даувальтер,** *канд. техн. наук, главный специалист* (*Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *https://orcid.org/0009-0007-5599-4275*, **Захар Иванович Слуковский,** *канд. биол. наук, заведующий научно-исследовательским сектором* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-4238-1617*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0