

УДК 556.5 (1-751.1)

## ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ В КАРЬЕРНЫХ ВОДОЕМАХ ГОРНОГО ПАРКА РУСКЕАЛА (КАРЕЛИЯ)

Г. С. Бородулина<sup>1\*</sup>, И. В. Токарев<sup>2</sup>, П. В. Медведев<sup>3</sup>, В. А. Шеков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),  
\*bor6805@yandex.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II  
(21-я линия В. О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106)

<sup>3</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

В работе отражены результаты гидрогеохимических исследований на территории Горного парка Рускеала, созданного на месторождении мрамора в Сортавальском районе (Республика Карелия). Приведена изотопно-геохимическая характеристика подземных и поверхностных вод объектов природного (р. Тохмайоки, малые озера) и искусственного происхождения (карьерные водоемы, затопленная штольня). Дан анализ распределения и накопления в воде микроэлементов, радиоактивных и радиогенных элементов. Показано, что водоемы в горных выработках образовались за счет поступления атмосферных осадков и подземных вод, химический состав которых трансформируется в зависимости от размеров выработок, степени их открытости к атмосфере и сезонности. Показана роль углекислого газа в сезонных вариациях химического состава воды в открытых водоемах. Для моделирования процесса взаимодействия воды с породой и установления характера их равновесия и направленности преобразования состава растворов во времени выполнены лабораторные эксперименты по выщелачиванию мрамора водой, рассчитаны индексы насыщения карбонатами опытных и природных растворов. Показано, что подземная вода поступает в карьер практически равновесной с карбонатами. В воде карьеров степень насыщения изменяется в течение года: зимой карбонаты способны растворяться, летом вода перенасыщена карбонатами, образуется взвесь. В отличие от подземных в составе карьерных вод отмечаются повышенные по сравнению с фоном концентрации нитратов, что связано с возрастающей рекреационной нагрузкой на территорию Горного парка.

Ключевые слова: Горный парк Рускеала; месторождение мрамора; карьерные водоемы; поверхностные воды; подземные воды; химический состав воды; водная вытяжка; равновесие с карбонатами; изотопы кислорода и водорода; Республика Карелия

Для цитирования: Бородулина Г. С., Токарев И. В., Медведев П. В., Шеков В. А. Формирование химического состава воды в карьерных водоемах Горного парка

Финансирование. Исследования в 2018–2019 гг. выполнены в рамках международного проекта BSUIN (“Baltic Sea Underground Innovation Network»), продолжены в рамках государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС, ИГ). Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» и в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ.

**G. S. Borodulina<sup>1\*</sup>, I. V. Tokarev<sup>2</sup>, P. V. Medvedev<sup>3</sup>, V. A. Shekov<sup>3</sup>.  
FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER IN WATER  
BODIES OCCUPYING QUARRIES IN THE RUSKEALA MINING PARK  
(KARELIA)**

<sup>1</sup>*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*bor6805@yandex.ru*

<sup>2</sup>*St. Petersburg Mining University named after Empress Catherine II (2 Vasilyevsky Island, 21st Line, 199106 St. Petersburg, Russia)*

<sup>3</sup>*Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia)*

This paper presents the results of hydrogeochemical studies in the Ruskeala Mining Park, created at a marble deposit in the Sortavala District (Karelia). It presents the isotope and geochemical characteristics of groundwater and surface waters in natural (Tohmajoki River, small lakes) and artificial (quarry reservoirs, a flooded adit) water bodies. The distribution and accumulation of trace elements, radioactive and radiogenic elements in water are analyzed. The process of marble quarry transformation into a reservoir is described, the main driver being the influx of atmospheric precipitation and groundwater, the chemical composition of which is altered within the workings depending on their size, degree of open-air exposure, and seasonality. The role of carbon dioxide in the seasonal variations of the water chemical composition in open water bodies is demonstrated. To establish the nature of the water-rock equilibrium and the vector of transformation of the solution's composition over time, laboratory experiments were conducted for marble leaching with water, and the carbonate saturation of experimental and natural solutions was calculated. It has been shown that groundwater enters the quarry at near equilibrium with carbonates. The degree of saturation in quarry water varies across the year: in winter, minerals are soluble, while in summer, the water is oversaturated with carbonates, forming a suspended solid. Unlike groundwater, quarry waters contain elevated nitrate concentrations compared to background levels, which is associated with the growing recreational pressure on the Mining Park premises.

**Keywords:** Ruskeala Mining Park; marble deposit; quarry reservoirs; surface waters; groundwater; aqueous extract; equilibrium with carbonates; chemical water composition; isotopes of oxygen and hydrogen; Republic of Karelia.

**For citation:** Borodulina G. S., Tokarev I. V., Medvedev P. V., Shekov V. A. Formation of the chemical composition of water in water bodies occupying quarries in of the Ruskeala Mining Park (Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 49–63. doi: 10.17076/lim2276

**Funding.** Research in 2018–2019 was conducted within the international BSUIN (Baltic Sea Underground Innovation Network) project and continued under state assignment to the Karelian Research Center RAS (NWPI, IG). The research was conducted using equipment of the KarRC RAS Core Facility and of the X-ray Diffraction Research Methods Resource Center of the St. Petersburg State University's Science Park.

## Введение

Горный парк Рускеала создан на месторождении мрамора в Северном Приладожье (Сортавальский район, Республика Карелия) на территории каменоломен, известных с середины 17 века и действовавших до конца 20 века. Добыча мрамора велась в основном на горе Белой в Главном карьере [Дорога..., 2014; Борисов, 2015]. С 1896 г. разработка на участке Рускеала-1 осуществлялась на шести горизонтах, три из которых были подземными. С 1946 г. подземный способ добычи мрамора уже не применялся, Главный карьер больше не эксплуатировался и после его полного осушения в 1947 г. начал заполняться водой [Анищенкова, Кудрев, 1954]. В северной части месторождения в обширной подземной выработке 3-го горизонта при обрушении кровли образовался так называемый Рускеальский провал – отверстие диаметром 20–24 м. Под ним в затопленной выработке (подземное озеро) сформировались грандиозные мраморные залы [Борисов, 2010]. Восстановление уровня воды в Главном карьере происходило со средней скоростью 3,1 м/год. За 6 лет (к 1953 г.) уровень воды с отметки +16 м восстановился на 40,65 м, за следующие 15 лет – еще на 24,15 м до отметки +80,8 м [Смирнова, 1969]. К началу 1970 г. уровень воды в карьерах стабилизировался и соответствует уровню подземных вод.

В 1950–70-х гг. на месторождении были заложены новые карьеры, в которых продолжалась добыча мрамора для производства извести, декоративной крошки, известковой муки, щебня. Разработка мрамора на участке Рускеала-1 закончилась в конце 1980-х годов, а на соседнем участке Рускеала-2 продолжалась до начала 2000-х. Расчет водопритока в карьер Рускеала-2 с отработкой горизонтов ниже уровня реки показал, что для откачки воды из карьера достаточно работы одного насоса мощностью 100 м<sup>3</sup>/час [Мустонен и др., 1957]. После окончания работ новые карьеры также заполнились водой. Так образовались озера Монферрана и Светлое, водоем в карьере Рускеала-2.

С 2005 г. на территории месторождения начал развиваться парк как исторический, природно-техногенный и ландшафтно-туристский объект. На сегодняшний день Горный парк – памятник историко-культурного (горнопромышленного) наследия Республики Карелия [Борисов, 2015; Шеков, 2021]. Основой парка являются Мраморный каньон – водоем в бывшем Главном карьере месторождения, и затопленная штольня в Рускеальском провале.

Следует отметить, что термин «каньон» (глубокая речная долина) не совсем удачно применен в названии образовавшегося водоема, но используется в работе как устоявшийся топоним.

Исследование процессов преобразования карьеров в водоемы имеет важное значение для региона с развитым горнопромышленным комплексом. После завершения добычи полезных ископаемых наблюдается процесс природного самообновления территории, нарушенной горными выработками. В обводнении горных выработок участвуют подземные воды и атмосферные осадки. При формировании химического состава воды в образовавшихся водоемах в исторический период затопления определяющим фактором является смешивание вод разного состава, в период стабилизации колебания состава воды связаны с метеорологическим фактором [Гайдин, 2012]. Карьеры Рускеалы являются ярким примером формирования водоемов в отработанных карьерах в период стабилизации и представляют собой модель формирования химического состава природных вод в карбонатных породах палеопротерозойского возраста. Цель нашей работы – изучение химического состава воды в карьерах на месторождении мрамора Рускеала и других водных объектов Горного парка для оценки роли подземных вод в формировании состава воды в обводненных горных выработках.

## Объекты и методы исследований

В геологическом отношении территория располагается в пределах области сочленения двух крупных структур Фенноскандинавского щита: архейского Карельского кратона и палеопротерозойского Свекофеннского орогена [Геология..., 2000]. Нижний структурный этаж образуют архейские гранито-гнейсы краевой части Карельского кратона, на которые ложатся палеопротерозойские породы верхнего структурного этажа в составе сортавальской и ладожской серий. Сортавальская серия сложена метаморфическим вулканогенно-карбонатным комплексом. Ладожская серия состоит преимущественно из метатерригенных пород. Кристаллические породы перекрыты чехлом четвертичных отложений различного состава и небольшой мощности. Карбонатные метаморфические породы осадочного происхождения в Приладожье характеризуются исключительным разнообразием по минеральному и химическому составу [Соколов, 1963].

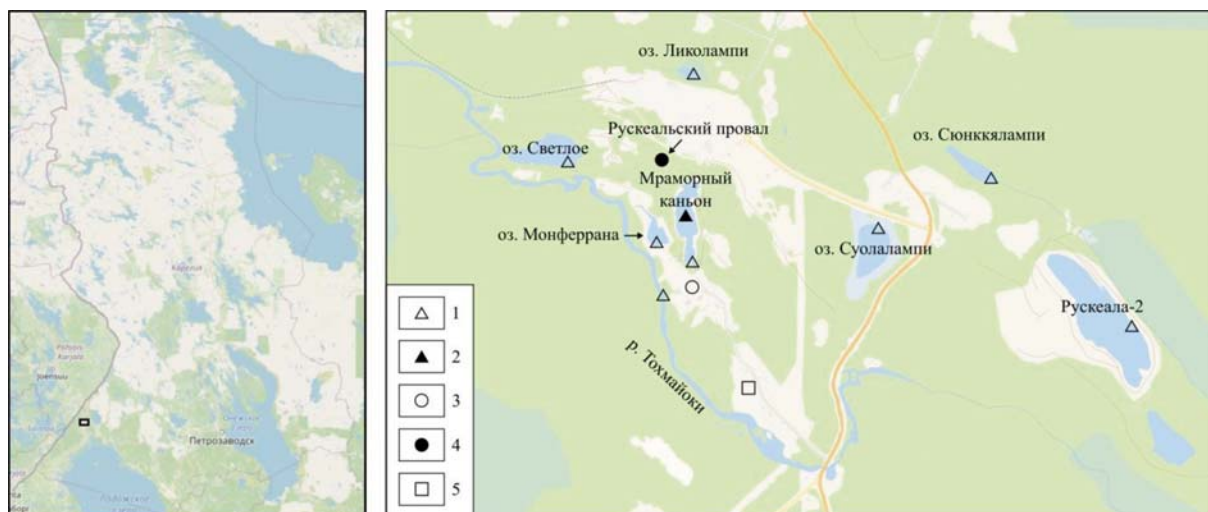


Рис. 1. Схема расположения станций опробования водных объектов на территории Горного парка Рускеала:

1 – поверхностные объекты (карьерные водоемы, озера, река); 2 – станция подледного зондирования в Мраморном каньоне; 3 – скважина; 4 – подземное озеро; 5 – колодец

Fig. 1. Layout of water sampling stations on the Ruskeala Mining Park territory:

1 – surface objects (quarry reservoirs, lakes, the river); 2 – subglacial sounding station in the Marble Canyon; 3 – well; 4 – underground lake; 5 – dug well

Рускеальское месторождение состоит преимущественно из кальцитовых и кальцит-доломитовых мраморов. Фильтрационные свойства трещиноватых карбонатных пород изменчивы и, как правило, низкие: по результатам откачек из восьми скважин на Рускеальском месторождении средний коэффициент фильтрации составил 0,0044 м/сут [Смирнова, 1969; Ресурсы..., 1987]. По данным разведочных работ и результатам бурения водозаборных скважин в п. Рускеала удельный дебит скважин оказался очень низким (0,002–0,012 л/с), поэтому в настоящее время большинство скважин не эксплуатируются. Опыт эксплуатации горных выработок на месторождении Рускеала также свидетельствует об очень низкой водообильности пород и весьма благоприятных гидрогеологических условиях для ведения горных работ. В. П. Соболевский [1839] отмечал, что «...вода мало заливаает работы...» и достаточно естественного стока воды в долину р. Русколки (Тохмайоки).

Подземные воды в районе месторождения приурочены к верхней части карбонатных и кремнисто-карбонатных пород. Из-за наличия перекрывающих глинистых отложений четвертичного чехла в большинстве случаев воды кристаллических пород имеют небольшой напор. Питание подземных вод осуществляется полностью за счет атмосферных осадков. Общее движение подземных вод направлено

в сторону р. Тохмайоки. В настоящее время видимый сток из Главного карьера (Мраморный каньон) с сезонным диапазоном расхода 0,5–2 л/сек наблюдается в штольне, направленной от Рускеальского провала к оз. Монферрана.

Рускеальское месторождение находится на левом берегу р. Тохмайоки, в среднем ее течении (рис. 1). Тойхмайоки – одна из крупных рек Северного Приладожья. В пределах Карелии ее длина составляет 64 км, площадь водосбора – 1602 км<sup>2</sup>, а средний многолетний расход воды – 9,2 м<sup>3</sup>/с [Каталог..., 2001]. Река протекает по юго-западной границе месторождения, вдоль северной и восточной его границ располагается ряд небольших (площадь менее 0,02 км<sup>2</sup>) озер. Озера Ликолампи и Суолалампи в период разработки месторождения были соединены между собой водоотводной канавой с последующим стоком в р. Тохмайоки [Сахаров, 1940]. Из оз. Сюнккялампи берет начало ручей, также впадающий в р. Тохмайоки в 2,3 км юго-восточнее своего истока.

Исследования проводились на территории Горного парка Рускеала в 2018–2022 гг. в разные сезоны года. Объектами изучения являлись: карьерные водоемы (Мраморный, Монферрана, Светлое, Рускеала-2), подземное озеро в Рускеальском провале, подземные воды территории, река Тохмайоки в пределах парка и окружающие его малые озера (Ликолампи, Суолалампи, Сюнккялампи) (рис. 1).

Отбор проб воды на химический анализ из открытых водоемов проводился с глубины 0,5 м прямым способом, подземной воды – из водозаборной скважины и колодца – сифонным. На месте отбора фиксировалась температура, измерялись pH, электропроводность воды. Для определения железа пробы воды консервировались 4M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, для микрокомпонентов – концентрированной HNO<sub>3</sub>. В течение суток пробы доставлялись в стационарную аналитическую лабораторию гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), где выполнялся химический анализ воды в соответствии с методами [Аналитические..., 2017]. В 2022 г. в водах карьеров определен общий азот (анализатор Shimadzu TOC-L<sub>CSN</sub>). Микроэлементный состав определен ICP-MS методом (масс-спектрометр Thermo Fisher Scientific) в Центре коллективного пользования Института геологии КарНЦ РАН (калибровка по международным стандартам IV-STOCK-1643). Измерения содержания дейтерия и кислорода-18 выполнены на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2120-i в Научном парке Санкт-Петербургского государственного университета. Ошибка измерения составляла ±0,1 ‰ для δ<sup>18</sup>O и ±1 ‰ для δ<sup>2</sup>H. Растворенный гелий определялся на магниторазрядном индикаторе ИНГЕМ-1. Объемная активность Rn-222 анализировалась радиометром PFA-01 и измерительным комплексом «Альфарад плюс». Предел относительной погрешности не более 30 %.

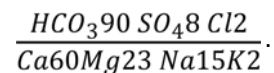
В марте 2019 г. в центре Мраморного каньона со льда выполнено зондирование водной толщи (зонд CastAway-CTD), получен вертикальный профиль температуры и электропроводности слоя воды, взяты пробы на химический состав воды поверхностного и придонного горизонтов водоема.

Для выяснения роли карбонатных пород в формировании химического состава воды, направленности процесса растворения и характера равновесия воды с породой выполнены лабораторные эксперименты по выщелачиванию мрамора (без видимых включений). Раздробленную породу различных фракций (< 1 мм, 1–3 мм и 3–5 мм) заливали дистиллированной водой в весовом соотношении порода-вода 1:5. Выполнялась серия последовательных вытяжек из одной и той же навески мрамора свежими порциями воды с различным временем контакта порода-вода: от 10 минут до 38 суток. Таким образом моделировался процесс многократного поступления воды в один и тот же объем раздробленной породы. Полученные растворы фильтровались и анализировались их химический состав.

С помощью программы PHREEQC, использующей базу термодинамических данных [Parkhurst, Appelo, 1999], рассчитан индекс насыщения SI раствора (Saturation index) к наиболее характерным минеральным фазам в зависимости от величины pH, Eh, температуры и химического состава опытных растворов и природных вод. Индекс насыщения характеризует недосыщенность или пересыщенность раствора по отношению к твердой фазе, т. е. указывает на потенциальную возможность растворения (при SI < 0) или осаждения (при SI > 0) минерала. Нулевое значение индекса говорит о равновесном состоянии раствора с минералом.

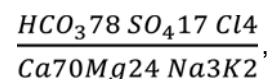
## Результаты и обсуждение

Подземные воды Ладожского геоблока в пределах Карелии по данным региональных исследований слабо- и среднеминерализованные (0,1–0,5 г/л), мягкие или умеренной жесткости, преимущественно околонеутральные или слабощелочные, гидрокарбонатные кальциево-магниевые [Ресурсы..., 1987]. Не является исключением подземная вода в районе Горного парка: минерализация воды в скважине составила 0,38 г/л (электропроводность 425 мкСм/см), pH 7,7, формула ионного состава воды имеет вид



В воде колодца электропроводность колеблется по сезонам от 435 до 488 мкСм/см, pH 7,3–7,5 (табл. 1). Среди подземных вод Северного Приладожья вода в скважине Горного парка выделяется самым высоким относительным содержанием гидрокарбонатов (рис. 2).

Минерализация поверхностного слоя воды в подземном озере и оз. Монферрана за период наблюдений 2018–2022 гг. в среднем составила 0,3 г/л, в Мраморном каньоне – 0,27 г/л. Сезонные колебания минерализации воды также невелики: минимальны в подземном озере и максимальны в Мраморном каньоне: от 0,24 г/л летом до 0,3 г/л в зимнюю межень. Вода всех выработок по химическому составу одинакова и отличается от подземной несколько более высоким содержанием сульфатов:



которые образуются в кислородной обстановке за счет окисления сульфидов, характерных для палеопротерозойских вулканогенно-осадочных пород [Кузнецов и др., 2021] (табл. 1, рис. 2).

Вертикальный профиль температуры и электропроводности воды в Мраморном каньоне отражает стратифицированную структуру слоя воды в зимний период: увеличение температуры до 5 °С и электропроводности до 405 мкСм/см у дна водоема (рис. 3).

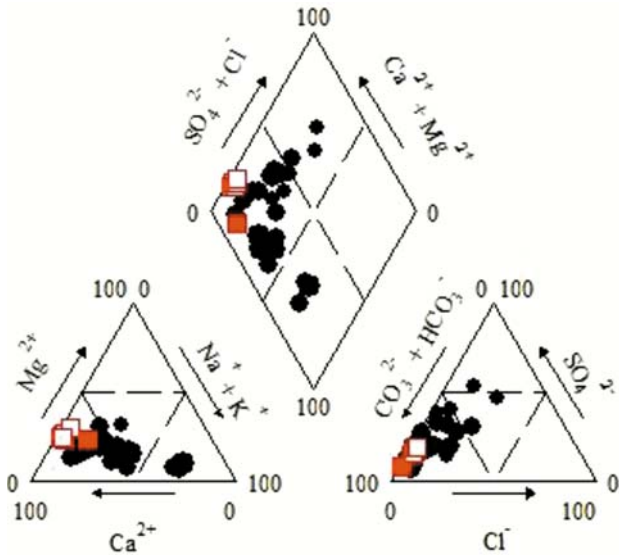


Рис. 2. Химический состав подземных вод Северного Приладожья:

красный квадрат – подземная вода из скважины Горного парка, незалитые квадраты – карьерные воды, черные значки – подземные воды района

Fig. 2. Chemical composition of groundwater in Northern Priladozhye:

red square – groundwater from the Mining Park well, unfilled squares – quarry water, black signs – groundwater in the region

В карьерах сезонные колебания состава воды определяются метеорологическими условиями (осадки, температура) и в большей степени характерны для углекислого газа и гидрокарбонат-иона, определяющих величину pH (рис. 4). Поступающая в карьеры подземная вода содержит  $\text{CO}_2$  в количестве 15 мг/л, практически такая же концентрация (14,6 мг/л) сохраняется зимой в придонном слое Мраморного каньона, уменьшаясь к поверхности до 6,2 мг/л, что обеспечивает увеличение pH соответственно от 7,5 до 7,8. Летом в поверхностном слое открытых водоемов  $\text{CO}_2$  практически отсутствует, так как вода прогревается до 17–20 °С и растворимость  $\text{CO}_2$  понижается. Кроме того, углекислый газ расходуется на биохимические процессы. В результате величина pH в поверхностном слое открытых водоемов летом возрастает до 8,3–8,6, в анионном составе появляется ион  $\text{CO}_3^{2-}$ , а концентрация  $\text{HCO}_3^-$  и электропроводность понижаются (рис. 4).

В отличие от карьеров с большой площадью открытого водного зеркала (Мраморный каньон, оз. Монферрана) в подземном озере (провал), значительно меньшем по размерам и практически закрытом от дневного света, ледовый покров сохраняется до июня и даже летом температура воды не поднимается выше 8 °С. Так как  $\text{CO}_2$  в воде подземного озера не расходуется на фотосинтез, его содержание зимой и летом мало изменяется (6,2–7,4 мг/л) и величина pH варьирует в небольшом диапазоне 7,7–7,9.

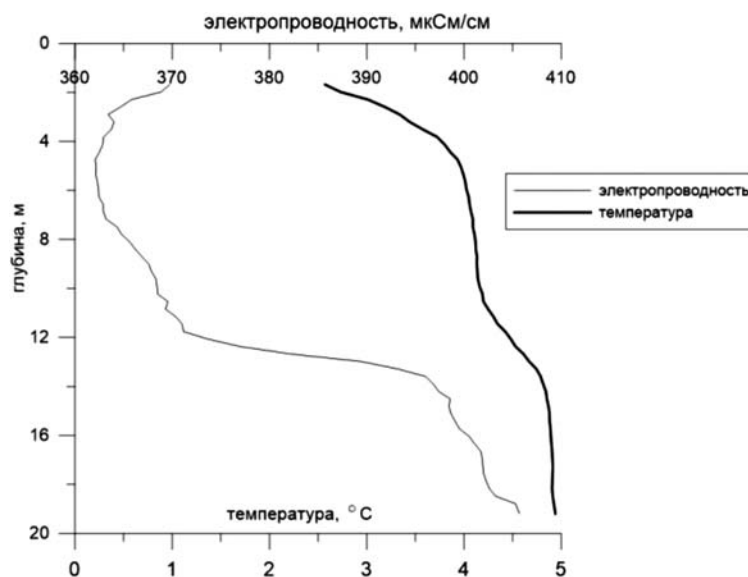


Рис. 3. Вертикальный профиль температуры и электропроводности воды в центре Мраморного каньона (20 марта 2019 г.)

Fig. 3. Vertical temperature and electrical conductivity profiles in the center of the Marble Canyon (March 20, 2019)

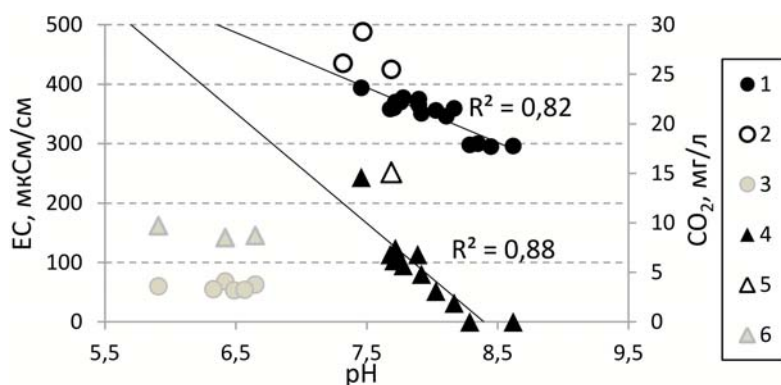


Рис. 4. Электропроводность, pH и CO<sub>2</sub> в подземных и поверхностных водах месторождения Рускеала:

1–3 – электропроводность (ЕС): 1 – карьерные водоемы, 2 – скважина, 3 – река; 4–6 – концентрация CO<sub>2</sub>: 4 – карьерные водоемы, 5 – скважина, 6 – река

Fig. 4. Electrical conductivity (EC), pH and CO<sub>2</sub> in groundwater and surface water of the Ruskeala deposit:

1–3 – electrical conductivity (EC): 1 – quarry water bodies, 2 – well, 3 – river; 4–6 – CO<sub>2</sub> concentration: 4 – quarry water bodies, 5 – well, 6 – river

Таблица 1. Химический состав подземных и карьерных вод на территории Горного парка

Table 1. Chemical composition of groundwater and quarry water on the Mining Park territory

Объект Object	Дата Date	Т °C	pH	ПО PI	∑ ионов TDS	ЕС мкСм/см µS/cm	CO <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	N-NO <sub>3</sub>	N <sub>общ</sub> N <sub>total</sub>	Fe
				мгО/л mgO/L	мг/л mg/L													
Скважина Well	16.08.2018	6,0	7,69	0,8	385	425	15,10	55,10	12,80	16,30	3,10	0,023	269,40	17,60	3,6	<0,02		0,56
Колодец Dug well	16.08.2018	6,0	7,32			435												
	20.03.2019	6,0	7,47			488												
Каньон поверхн. слой Сапуон surface layer	13.07.2016		8,35			300												
	16.08.2018	19,5	8,62	3,1	236	296	0	45,7	9,0	1,9	2,4	0,023	149,5	22,5	4,8	<0,02		0,14
	20.03.2019	1,0	7,76	3,3	296	370	6,2	54,3	12,0	2,0	2,8	0,016	188,7	29,0	4,9	0,25		0,05
	03.08.2020	17,4	8,29	3,8	250	298	0	45,8	9,3	2,1	2,2	0,101	160,6	25,6	4,6	<0,02		0,06
	14.08.2021		8,45			295												
27.11.2022	0,8	7,92	3,0	296	351		52,9	10,7	2,9	2,8	0,085	185,0	32,9	5,9	0,20	0,46	0,07	
Каньон придон- ный слой Сапуон bottom layer	20.03.2019	4,5	7,46	4,6	325	405	14,6	59,3	12,4	1,8	2,9	0,442	209,2	29,6	4,8	0,07		0,11
Подзем- ное озеро Under- ground lake	04.05.2018	1,4	7,71	4,3	270	360	6,2	55,4	11,3	2,2	2,8	0,023	176,0	14,4	5,4	0,54		0,13
	16.08.2018	8,0	7,89	2,6	320	372	6,8	58,0	11,6	2,0	2,9	0,023	199,2	36,9	5,4	0,34		0,04
	20.03.2019	0,8	7,68	3,1	291	358	6,8	53,7	11,4	2,1	2,8	0,008	182,7	31,1	4,8	0,22		0,06
	03.08.2020	6,8	7,72	3,2	304	370	7,4	56,2	11,1	2,4	2,9	0,062	189,1	35,0	4,9	0,18		0,05
	27.11.2022	4,0	7,90	4,3	293	365	6,4	51,6	11,7	3,8	2,8	0,10	184,0	30,7	6,3	0,20	0,65	0,05
Оз. Мон- феррана Lake Mont- ferrand	04.05.2018	1,6	7,78	4,3	292	377	5,7	58,6	13,0	2,1	2,8	0,023	193,0	13,0	5,8	0,79		0,09
	16.08.2018	20,0	8,17	3,6	290	359	1,9	50,0	13,3	2,5	3,7	0,062	180,6	33,5	4,8	0,16		0,06
	03.08.2020	18,3	8,03	4,4	286	356	3,1	49,2	12,2	3,0	3,0	0,062	181,5	31,0	5,1	0,07		0,03
	14.08.2021		8,11			346												
27.11.2022	2,2	7,90	3,2	320	375		53,8	13,8	3,3	3,5	0,17	198,1	39,5	5,1	0,29	1,24	0,04	
Р. Тохма- йоки Tohma- joki River	04.05.2018	3,6	5,91	23,1	39	60	9,7	6,0	1,4	1,8	1,2	0,047	5,0	14,2	3,2	0,45		1,00
	16.08.2018	19,6	6,65	21,6	38	63	8,7	5,9	1,4	2,6	1,7	0,163	12,4	7,9	3,6	0,09		1,47
	20.03.2019	0,3	6,42	28,4	54	68	8,5	6,5	1,7	2,7	1,6	0,085	13,1	12,7	3,3	0,05		1,20
	03.08.2020		6,33			55												
	14.08.2021		6,49			53												

Рисунок 4 отражает практически синхронное снижение концентрации  $\text{CO}_2$  с ростом величины рН и минерализации воды в карьерных водоемах в отличие от поведения этих показателей в речной воде.

Вода р. Тохмайоки по химическому составу резко отличается от карьерных водоемов, в первую очередь цветностью и минерализацией. Вода в карьерах и скважине малоцветная (6–12 град.), в то время как в р. Тохмайоки достигает 157–216 град., и это объясняет ее местное название – Русколка (от финского *ruskea* – коричневый, рыжий). Причиной служит значительное содержание в речной воде органических веществ (ОВ) и железа: величина перманганатной окисляемости (ПО) достигает 22–28 мгО/л, железа общего – 1–1,5 мг/л. Речная вода среди исследованных объектов отличается минимальными величинами рН и электропроводности (рис. 5).

Для р. Тохмайоки, как и для большинства рек Северного Приладожья, характерно сезонное изменение состава воды: весной при поступлении с водосбора талых кислых вод наблюдается снижение величины рН, рост доли сульфатов в ионном составе и увеличение содержания ОВ [Состояние..., 2007; Комулайнен и др., 2016]. В соответствии с отмеченной особенностью состав речной воды весной 2018 г. характеризовался как сульфатно-кальциевый, слабокислый (рН 5,9). В летнюю межень 2018–2021 гг. показатель рН увеличивался до 6,3–6,65, а состав воды менялся на гидрокарбонатно-кальциевый (табл. 1). Загрязнение речной воды выражалось в появлении нефтепродуктов (0,09 мг/л) и нитратов (0,45 мгN/л) в весенний паводок, а в летнюю межень – в высокой концентрации фосфора общего (69 мкг/л) против 9 мкг/л в зимнюю.

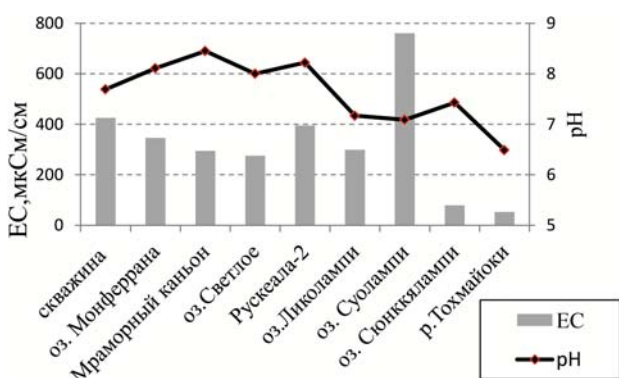


Рис. 5. Электропроводность (ЕС) и рН воды в объектах Горного парка (август 2021)

Fig. 5. Electrical conductivity (EC) and pH of water in the Mining Park objects (August 2021)

Исследования предыдущих лет определили эвтрофный статус реки, основная роль такого состояния принадлежит рассредоточенным (площадным) источникам загрязнения [Состояние..., 2007; Комулайнен и др., 2016].

Малые озера в районе месторождения также высокоцветны (56–153 град.), но в отличие от речной озерные воды характеризуются более высокими показателями рН (7,1–7,4). По минерализации озера очень различаются между собой: электропроводность воды изменяется от 79 мкСм/см (оз. Сюнккялампи) до 300 мкСм/см (оз. Ликолампи) и достигает 760 мкСм/см (оз. Суолампи) (рис. 5). Самое маломинерализованное оз. Сюнккялампи располагается гипсометрически выше всех отмеченных водоемов, получает преимущественно атмосферное питание и не испытывало прямого влияния горных работ. Напротив, два других озера имеют подземное питание и с начала эксплуатации месторождения испытывают постоянную техногенную нагрузку. По свидетельству В. П. Соболевского [1839], «...излишний щебень из главной ломки вывозился через проход, пробитый в скалах с северной стороны прямо в долину, где находятся озера Лико и Суло». Кроме того, оз. Ликолампи находится в непосредственной близости от дробильной фабрики и обжиговых печей известкового завода, окончательно потушенных лишь в 90-х годах прошлого века, а в оз. Суолампи с начала разработки месторождения осуществлялся сток с промышленных площадок и отвалов карьеров.

Концентрации микроэлементов в воде Мраморного каньона, подземного озера и р. Тохмайоки варьируют в большом диапазоне значений: от <0,01 до сотен мкг/л (табл. 2). Большая группа элементов (Sr, Ba, Zn, Fe, Al, U, B, Se, Ni, Cu, Rb, Ga, Li) обнаруживается во всех пробах в концентрациях более 1 мкг/л. В карьерных водах максимальные концентрации отмечаются для Sr и Ba, характерных для условий карбонатакопления (260 и 180 мкг/л соответственно). Поверхностный и придонный слой воды в каньоне незначительно различаются по концентрации элементов, за исключением марганца, содержание которого в придонном слое в восстановительных условиях возросло на два порядка, до 708 мкг/л. В речных слабокислых и высокогумусовых водах хорошо мигрируют Fe и Al (803 и 150 мкг/л) и другие элементы (Cr, Co, Ni, Be), образующие органоминеральные формы. В щелочных карьерных водах некоторые аниогенные элементы (Se, B, Mo, W) присутствуют в концентрациях выше фоновых региональных [Водные..., 2006]. Самым контрастным элементом в исследованных

пробах является уран, концентрации которого в карьерных водах достигают 13,5–18,7 мкг/л, что на три порядка выше фоновой величины для подземных вод региона и содержания в речной воде (табл. 2). Источником урана может служить уранинит в ассоциации с урансодержащим апатитом, рудная минерализация которых связана с Рускеальским разломом, контролирующим размещение урановых рудных объектов в северо-восточном крыле

Кирьяволахтинского купола [Ладожский..., 2020]. Природные водорастворимые формы урана связаны в основном с U (VI). Существенная миграция урана возможна только в окислительных или слабовосстановительных условиях. Практически весь шестивалентный уран в водах в широком интервале pH находится в форме карбонатных комплексов уранила, в щелочных растворах преобладает  $UO_2(CO_3)_3^{4-}$  [Бородулина, Мазухина, 2005].

Таблица 2. Концентрации элементов (мкг/л) в карьерных водах и р. Тохмайоки (20.03.2019)

Table 2. Element concentrations (µg/L) in the quarry water and Tohmajoki River (03/20/2019)

Элемент Element	Река River	Подземное озеро Underground lake	Мраморный каньон Marble Canyon		Региональный фон подземных вод* Regional mean groundwater*
			Поверхность Surface	Придонный слой Bottom layer	
Li	1,99	1,52	1,54	1,41	1,9
Be	0,034	0,002	0,004	0,002	<0,02
B	11,15	16,23	16,51	15,58	10
Al	148,7	3,00	16,98	2,22	35
Sc	3,85	3,64	3,52	3,63	2,5
Ti	5,49	0,70	0,65	1,11	1,6
V	0,50	0,14	0,20	0,29	0,4
Cr	0,64	0,26	0,43	0,35	0,9
Mn	44,5	2,24	2,67	708,5	24,4
Fe	802,7	38,29	45,65	99,25	200
Co	0,27	0,08	0,13	0,12	0,18
Ni	2,72	1,33	1,63	1,46	2
Cu	1,87	1,91	13,43	2,93	2,5
Zn	5,63	6,21	16,94	5,41	36
As	0,45	0,45	0,52	0,48	0,5
Se	12,19	11,44	11,71	12,43	5
Br	0,50	0,79	0,75	0,50	0,5
Rb	2,72	2,83	2,85	2,59	1,7
Sr	27,6	247,7	255,4	263,6	81
Y	0,257	0,013	0,01	0,025	0,17
Zr	0,173	0,006	0,005	0,012	0,05
Nb	0,018	0,004	0,006	0,006	<0,01
Mo	0,12	1,06	1,07	0,32	0,38
Ag	0,006	0,004	0,004	0,003	<0,01
Cd	0,026	0,01	0,367	0,038	0,06
Sn	0,025	0,021	0,056	0,019	0,02
Sb	0,04	0,17	0,19	0,05	0,09
Cs	0,021	0,03	0,036	0,031	0,01
Ba	33,0	142,1	145,6	177,5	57
W	0,021	0,06	0,086	0,195	0,03
Hg	0,065	0,052	0,070	0,098	0,05
Tl	0,085	0,097	0,097	0,089	0,01
Pb	0,283	0,095	0,256	0,185	0,7
Bi	0,003	0,002	0,003	0,002	<0,01
Th	0,038	0,001	0,001	0,001	<0,01
U	0,09	18,75	18,50	13,54	0,09

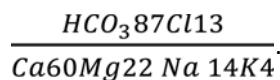
Примечание. \*По данным: [Водные..., 2006].

Note. \*According to data: [Water..., 2006].

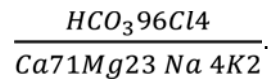
Как известно, на кристаллических щитах нет прямой связи между составом породы и подземных вод [Шварцев, 1998; Бородулина, Левичев, 2019]. Состав подземных вод может определяться составом вмещающих пород только в случае присутствия в них относительно растворимых образований, например карбонатов. Процесс их растворения, происходящий по обобщенной схеме  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ , продолжается до наступления равновесия.

Серия последовательных водных вытяжек из навесок рускеальского мрамора различной степени дробления продемонстрировала резкое повышение величины pH опытных растворов (до pH 9,6) в первые минуты взаимодействия с дистиллированной водой (pH 5,7), затем постепенное понижение показателей в повторных вытяжках и относительную стабилизацию на значениях pH около 8,2–8,5 спустя 2 недели после начала опыта (рис. 6). Электропроводность растворов также резко увеличилась в первые минуты, после чего скорость роста замедлилась, но продолжала повышаться до конца опытов, и через 38 суток электропроводность достигла 120–130 мкСм/см. Степень дробленности породы незначительно влияет на величину pH и электропроводность (рис. 6).

В первые сутки взаимодействия мрамора с водой образовались сильнощелочные слабоминерализованные гидрокарбонатные кальциево-магниевые растворы с заметной долей ионов натрия и хлора:



Осадочное происхождение карбонатных пород объясняет повышенное содержание хлоридов и натрия в растворе первой вытяжки, они легко вымываются из породы в первые минуты. Промытый мрамор образует растворы уже с меньшей долей хлоридов и натрия, и в последнем опыте (время контакта 38 суток) формула ионного состава раствора имеет вид



Тип катионного состава опытных растворов аналогичен типу воды в скважине и карьерах, анионный же состав вытяжек из чистого мрамора отличается полным отсутствием сульфатов, которые в природные воды поступают за счет окисления сульфидов.

Из результатов физико-химического моделирования состава опытных растворов, полученных при выщелачивании мрамора, следует, что с увеличением времени взаимодействия порода-вода индекс насыщения раствора (SI) карбонатами приближается к нулю (равновесию) и возможность растворения минералов уменьшается (табл. 3). Также равновесна с карбонатами вода из скважины, т. е. подземная вода поступает в карьер практически насыщенной. В воде Мраморного каньона степень насыщения изменяется в течение года: в подледных условиях  $SI < 0$  и минералы способны растворяться, летом вода перенасыщена карбонатами ( $SI > 0$ ) и их микроскопическая взвесь при преломлении света придает воде каньона характерный зеленовато-голубой цвет.

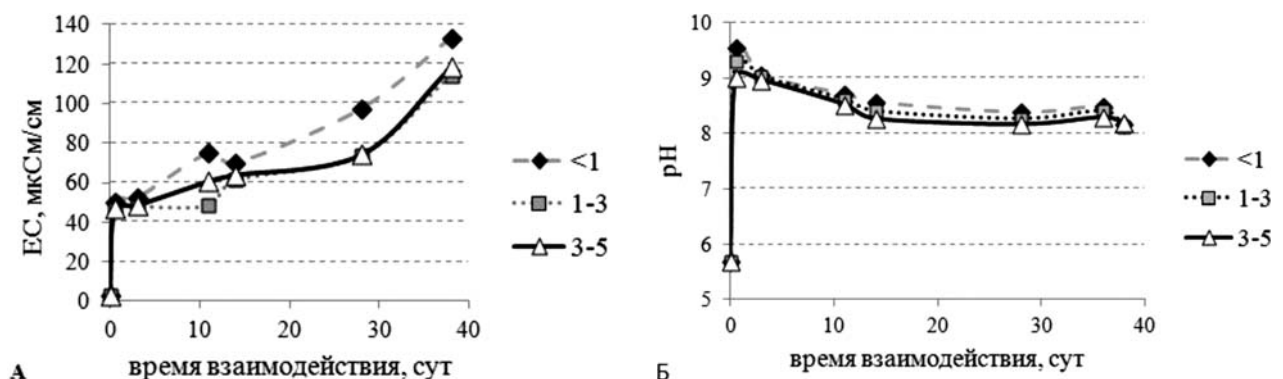


Рис. 6. Изменения электропроводности (ЕС) и pH опытных растворов при контакте дистиллированной воды с мрамором (фракции: <1 мм; 1–3 мм; 3–5 мм) в зависимости от времени контакта. Нулевое время на графике – показатели дистиллированной воды (pH = 5,7 и ЕС = 3 мкСм/см)

Fig. 6. Changes in pH and electrical conductivity (EC) of experimental solutions upon contact of distilled water with marble (fractions: <1 mm; 1–3 mm; 3–5 mm) depending on contact time. Zero time on the graph is the distilled water index (pH = 5.7 and EC = 3 μS/cm)

Таблица 3. Степень насыщения опытных растворов и природной воды относительно карбонатов (результаты термодинамического моделирования, PHREEQC)

Table 3. Degree of saturation of experimental solutions and natural water to minerals (results of thermodynamic modeling, PHREEQC)

Минерал Mineral	Индекс насыщения (SI) Saturation Index (SI)				
	Опытный раствор Experimental solution		Скважина Well	Мраморный каньон Marble Canyon	
	3 сут 3 day	38 сут 38 day		Март 2019 March 2019	Август 2020 August 2020
Calcite $\text{CaCO}_3$	-0,93	0	0,03	-0,02	0,92
Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	-2,21	-0,33	0,02	-0,43	1,48

Характеризуя газовый состав подземной воды на месторождении, следует отметить повышенное содержание радона и гелия в воде скважины:  $Rn = 1500$  Бк/л,  $He = 1,6 \cdot 10^{-3}$  мл/л. В воде колодца содержание радона уже значительно меньше – 90 Бк/л, в подземном озере – 7 Бк/л, а в открытых карьерных водоемах радон не обнаруживается. Как известно, Северное Приладожье – один из наиболее радоно-аномальных районов Карелии, совпадающий с одной из радиогеохимических линейных зон региона [Савицкий и др., 1992; Бородулина, Левичев, 2019]. В Каталоге минеральных вод СССР [1969] среди радоновых проявлений на территории Карелии на Рускеальском месторождении отмечена скважина с концентрацией радона около 6000 Бк/л.

Также характерно для подземных вод Северного Приладожья высокое фоновое содержание растворенного гелия –  $10^{-2}$  мл/л, что на три порядка выше концентрации, равновесной с атмосферой. Максимальная величина в Северном Приладожье (0,55 мл/л) отмечена в районе г. Питкяранты [Ресурсы..., 1987; Богачев, Бородулина, 2008]. Как известно, повышенные концентрации гелия характерны для подземных вод замедленного водообмена, что позволяет выявлять современные мобильные разломы [Якуцени, 1968; Яницкий, 1979; Tokarev et al., 2019]. Природа гелиевых аномалий – это разгрузка вод глубокой циркуляции по зонам повышенной проницаемости в районах масштабной блоковой неотектонической активности в северной части котловины Ладожского озера [Ладожская..., 2020].

Высокая концентрация гелия ( $2,4 \cdot 10^{-3}$  мл/л) в придонном слое Мраморного каньона, практически такая же, как в воде скважины, является прямым индикатором подземного питания карьера. Даже в подледном слое каньона зафиксирована повышенная концентрация гелия

( $2,5 \cdot 10^{-4}$  мл/л), а в подземном озере гелий в количестве  $1,8-2,6 \cdot 10^{-4}$  мл/л сохраняется и в летний период.

Изотопный состав воды (дейтерий, кислород-18) в опробованных объектах варьирует в достаточно большом диапазоне и демонстрирует изменение состава поступающей подземной воды в водоем (рис. 7). Изотопный состав воды Рускеальской скважины близок к среднему показателю подземных вод Карелии ( $^{18}\text{O} \approx -13,4$  ‰ и  $^2\text{H} \approx -97$  ‰) [Tokarev et al., 2019; Borodulina et al., 2023]. В карьерных водоемах в результате смешения подземной воды с атмосферными осадками и испарения с открытой поверхности в изотопном составе происходит закономерное увеличение доли тяжелых изотопов, поэтому на классической  $\delta^{21}\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$  диаграмме наблюдается смещение фигуративных точек от локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) (рис. 7). Изотопный состав воды в карьерах летом (август 2018 г.) за счет испарения оказался более тяжелым по сравнению с подземной водой, угловой коэффициент уравнения регрессии, аппроксимирующего результаты летних анализов, близок к теоретическому значению для неравновесных условий испарения и составляет 4,56 [Dansgaard, 1964; Ferronsky, Polyakov, 2009]. По точке пересечения линии аппроксимации и ЛЛМВ можно оценить начальный изотопный состав воды в водоемах:  $\delta^{18}\text{O} \approx -13,8$  ‰ и  $\delta^{21}\text{H} \approx -100$  ‰ (рис. 7) [Tokarev et al., 2019]. Эта величина соответствует среднему составу подземных вод региона и подтверждает подземный источник формирования карьерных вод. Проба из подземного озера, отобранная в мае 2018 г., отличается более легким изотопным составом, чем летние карьерные пробы, и в большей степени сохраняет черты исходной подземной воды (рис. 7).

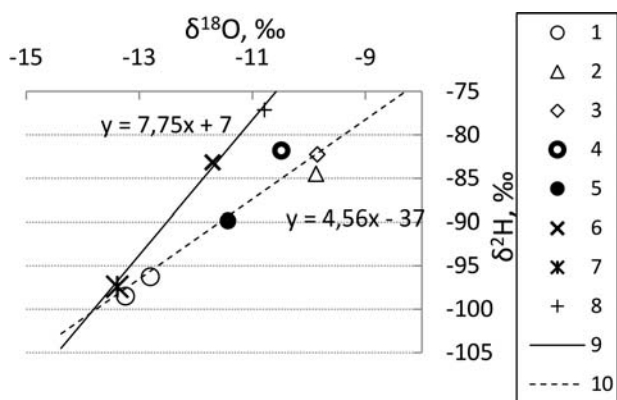


Рис. 7. Изотопный состав водных объектов Горного парка:

1–4 – объекты, опробованные в августе 2018 г. (1 – скважина, колодец; 2 – Мраморный каньон; 3 – оз. Монферрана; 4 – подземное озеро), 5 – подземное озеро (май 2018), 6 – средний состав атмосферных осадков Карелии, 7 – средний состав подземных вод Карелии, 8 – локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), 9 – линия аппроксимации точек опробования (август 2018)

Fig. 7. Isotopic composition of water bodies in the Mining Park:

1–4 – objects sampled in August 2018 (1 – well, dug well; 2 – Marble Canyon; 3 – Lake Montferrand; 4 – underground lake), 5 – underground lake (May 2018), 6 – average composition of atmospheric precipitation in Karelia, 7 – average composition of groundwater in Karelia, 8 – local line of meteoric waters (LLMW), 9 – approximation line of sampling points (August 2018)

Несмотря на сходство подземной и карьерной воды по минерализации и химическому составу, основное отличие – повышенное содержание нитратного азота в исследованных водоемах (до 0,8 мгN/л) по сравнению с фоновыми показателями для поверхностных (0,01 мгN/л) и подземных (0,2 мгN/л) вод Карелии [Лозовик, Бородулина, 2009]. Причем в период весеннего половодья содержание нитратного азота в воде карьеров было выше, чем в р. Тохмайоки (табл. 1), хотя в речных водах концентрации всех форм азота обычно выше, чем в озерных, в которых происходит переход минеральных форм азота в органическую и захоронение ОВ в донных отложениях.

Основным источником поступления соединений азота на территорию Карелии в естественных условиях являются атмосферные осадки, в которых медианные значения  $N_{\text{общ}}$  с севера на юг изменяются в пределах 0,33–0,42 мгN/л, а преобладающей формой азота являются  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$  [Лозовик, Потапова, 2006]. В окислительной среде водоемов  $\text{NH}_4^+$  подвергается нитрификации, конечным продуктом которой являются нитраты, которые, в свою

очередь, потребляются бактериями и водорослями с образованием органического азота.

Прямые определения  $N_{\text{общ}}$  в отдельных пробах карьерных вод Рускеалы показали значения 0,46–1,24 мгN/л (табл. 1), содержания  $N_{\text{орг}}$  составили 0,17–0,78 мгN/л, что значительно выше средней концентрации для подземных вод (0,06 мгN/л) и сравнимо с поверхностными (0,44 мгN/л) [Лозовик, Бородулина, 2009]. Для поверхностных вод Карелии характерно низкое содержание минеральных форм азота и достаточно стабильное органического. Ситуация, когда сумма минеральных форм азота близка к органическим, что наблюдается в нашем случае, характерна для водоемов с антропогенно трансформированными водосборами. Таким образом, расширение туристской инфраструктуры и возрастающая рекреационная нагрузка на территорию Горного парка приводят к тому, что нитраты, как конечный продукт трансформации азотных соединений, поступающих с атмосферными выпадениями и хозяйственно-бытовым загрязнением, накапливаются в воде карьеров в условиях слабого водообмена и слабого развития биоты.

## Заключение

Исследования водоемов природного и искусственного происхождения на территории Горного парка Рускеала показали, что на месторождении мрамора в горных выработках (Мраморный каньон, оз. Монферрана, подземное озеро) сформировались водоемы, химический состав воды которых идентичен составу подземных вод по химическому типу (гидрокарбонатные кальциево-магниевые) и минерализации (0,25–0,32 г/л). Изотопно-химический и газовый состав поступающих в выработки подземных вод трансформируется в карьерах в зависимости от их площади, открытости к атмосфере и сезонности. Чем больше площадь открытого водного зеркала в выработках, тем ниже минерализация воды и больше диапазон ее сезонных колебаний. Из результатов физико-химического моделирования следует, что подземная вода поступает в карьер практически насыщенной по отношению к карбонатам, в открытых условиях в течение года равновесие нарушается: зимой минералы способны растворяться, летом вода пересыщена карбонатами и их микроскопическая взвесь придает воде каньона характерный цвет.

Вода р. Тохмайоки отличается от карьерных вод высокой цветностью и малой минерализацией. Малые озера на территории парка также высокоцветны, но минерализация их воды из-

меняется в зависимости от связи с подземным стоком и влиянием горных работ.

В карьерных водах зафиксированы повышенные концентрации многих микроэлементов; самым контрастным из них является уран, источником которого служит рудная минерализация, связанная с Рускеальским разломом. С радиогеохимическими зонами связано и высокое содержание радона в подземной воде месторождения, следы радона обнаруживаются и в воде подземного озера. Высокая концентрация гелия в карьерных водах является прямым индикатором подземного питания карьера. Исследования изотопного состава воды в водоемах также подтверждают подземный источник формирования карьерных вод.

В отличие от подземных в карьерных водах фиксируются азотные соединения в концентрациях выше фоновых, что может свидетельствовать о загрязнении слабопроточных водоемов в условиях возрастающей рекреационной нагрузки. Необходимы дальнейшие исследования по оценке влияния хозяйственной деятельности на состояние водной среды территории.

## Литература

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике* / Ред. П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко. СПб: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Анищенко О. Н., Кудрев А. Ф.* Отчет о разведке месторождения мрамора Рускеала-1 в Сортавальском р-не КФССР в 1952–1953 гг. Кар. ТФГИ, 1954.
- Богачев М. А., Бородулина Г. С.* Связь аномалий гелия в подземных водах Карелии с тектоническими зонами // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Мат-лы 14-й междунар. конф. (Петрозаводск, 27–31 октября 2008 г.). Часть 1. Петрозаводск, 2008. С. 62–63.
- Борисов И. В.* Подземные выработки месторождения мрамора Рускеала-I (Карелия) // Спелеология и спелестология. 2015. № 6. С. 218–222.
- Борисов И. В.* Рускеальские каменоломни. Сортавала: Ракурс, 2010. 23 с.
- Бородулина Г. С., Левичев М. А.* Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 71–75.
- Бородулина Г. С., Мазухина С. И.* Подземные воды Заонежья // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 48–54.
- Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества* / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Портттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. 263 с.
- Гайдин А. М.* Преобразование карьеров в озера // Метеорология и гидрология. 2012. № 7. С. 77–91.
- Геология и петрология свекофеннид Приладожья* / Ред. В. А. Глебовицкий. СПб.: Изд. СПб. ун-та, 2000. 200 с.
- Дорога горных промыслов* / Ред. В. А. Шеков. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 362 с.
- Каталог минеральных вод СССР. Приложение к карте минеральных вод СССР масштаба 1:4 000 000* / Глав. ред. В. В. Иванов. М., 1969. 287 с.
- Каталог озер и рек Карелии* / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 286 с.
- Комулайнен С. Ф., Лозовик П. А., Круглова А. Н., Барышев И. А., Галибина Н. А.* Оценка экологического состояния рек Северного побережья Ладожского озера по химическим показателям и структуре гидробиоценозов // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 3. С. 277–286. doi: 10.7868/S0321059616030093
- Кузнецов А. Б., Горохов И. М., Азимов П. Я., Дубинина Е. О.* С- и Sr-хемостратиграфический потенциал палеопротерозойских осадочных карбонатов в условиях среднетемпературного метаморфизма: мрамора Рускеала, Карелия // Петрология. 2021. Т. 29, № 2. С. 172–194. doi: 10.31857/S0869590321010039
- Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения)* / Ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.
- Лозовик П. А., Потапова И. Ю.* Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С.* Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.
- Мустонен А. А., Нокелайнен С. И., Нокелайнен М. В.* Отчет о геологоразведочных работах и подсчете запасов на 01.01.1957 г., проведенных на месторождении Рускеала II в Сортавальском р-не КАСССР в 1956–57 гг. Кар. ТФГИ, 1957.
- Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии* / Отв. ред. В. С. Самарина. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1987. 151 с.
- Савицкий А. В., Титов В. К., Мельников В. К.* Уран, торий, калий в горных породах Карелии и вопросы радиоэкологии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. С. 99–113.
- Сахаров А. С.* Отчет о работах геологоразведочной партии на месторождении Рускеала-I в 1940 г. Кар. ТФГИ, 1940.
- Смирнова А. Г., Рыцарева З. В.* Отчет о результатах ревизионных работ, проведенных на месторождении мрамора Рускеала-I в 1967–69 гг. (Сортавальский район КАСССР). Кар. ТФГИ, 1969.
- Соболевский В. П.* Геогностическое обозрение старой Финляндии и описание Рускольских мраморных ломов. СПб., 1839. 140 с.
- Соколов В. А.* Геология и литология карбонатных пород среднего протерозоя Карелии. М.; Л., 1963. 183 с.

Состояние водных объектов Республики Карелия / Ред. П. А. Лозовик, Т. П. Куликова, Н. Н. Мартынова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.

Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., испр. и доп. М.: Недра, 1998. 336 с.

Шеков В. А. Природные риски и системы мониторинга: на примере объектов горнопромышленного наследия Карелии (Рускеальский горный парк) // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 2. С. 214–227. (На англ.). doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-214-227

Якуцени В. П. Геология гелия. Л.: Недра, 1968. 232 с.

Яницкий И. Н. Гелиевая съемка. М.: Недра, 1979. 96 с.

Borodulina G., Tokarev I., Yakovlev E. Isotope composition of natural water in the Lake Onega basin // Water. 2023. Vol. 15. Art. 1855. doi: 10.3390/w15101855

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. 16(4). P. 436–463. doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993

Ferronsky V. I., Polyakov V. A. Isotopes of the Earth's hydrosphere. Netherlands: Springer, 2012. 630 p.

Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. User's guide to PHREEQC (Version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. Denver: U.S. Geological Survey, 1999.

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene–Holocene in groundwater stable isotopes ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) // Quat. Int. 2019. Vol. 524. P. 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022

## References

Anishchenkova O. N., Kudrev A. F. Report on exploration of the Ruskeala-1 marble deposit in the Sortavala District of the KFSR in 1952–1953. Kar. TFGI, 1954. (In Russ.)

Bogachev M. A., Borodulina G. S. Relationship of helium anomalies in groundwater of Karelia with tectonic zones. *Svyaz' poverkhnostnykh struktur zemnoi kory s glubinnymi: Mat-ly 14-i mezhdunar. konf. (Petrozavodsk, 27–31 okt. 2008 g.) = Relationship of surface structures of the Earth's crust with deep ones: Proceed. of the 14<sup>th</sup> int. conf. (Petrozavodsk, Oct. 27–31, 2008)*. Pt. 1. Petrozavodsk; 2008. P. 62–63. (In Russ.)

Borisov I. V. Ruskeala quarries. Sortavala: Rakurs; 2010. 23 p. (In Russ.)

Borisov I. V. Underground workings of the Ruskeala-1 marble deposit (Karelia). *Speleologiya i spelestologiya = Speleology and Speleostology*. 2015;6:218–222. (In Russ.)

Borodulina G. S., Levichev M. A. Resources and geochemistry of groundwater in Karelia. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019;3:71–75. (In Russ.)

Borodulina G. S., Mazukhina S. I. Groundwater of the Zaonezhye area. *Ekologicheskie problemy osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma = Environmental problems of the Middle Padma deposit development*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. P. 48–54. (In Russ.)

Borodulina G., Tokarev I., Yakovlev E. Isotope composition of natural water in the Lake Onega basin. *Water*. 2023;15:1855. doi: 10.3390/w15101855

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964;16(4):436–463. doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993

Ivanov V. V. (ed.). Catalogue of mineral waters of the USSR. Appendix to the map of mineral waters of the USSR at a scale of 1:4,000,000. Moscow; 1969. 287 p. (In Russ.)

Ferronsky V. I., Polyakov V. A. Isotopes of the Earth's hydrosphere. Netherlands: Springer; 2012. 630 p.

Filatov N. N., Litvinenko A. V. (eds.). Catalogue of lakes and rivers of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. 286 p. (In Russ.)

Filatov N., Litvinenko A., Syarkioya A., Porttikivi R., Regerand T. (ed.). Water resources of the Republic of Karelia and ways of their use for drinking water supply. Experience of Karelian-Finnish co-operation. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. 263 p. (In Russ.)

Gaidin A. M. Conversion of quarries into lakes. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2012;7:77–91. (In Russ.)

Glebovitskii B. A. (ed.). Geology and petrology of the svekofennides of the Ladoga area. St. Petersburg: SPb. Univ.; 2000. 200 p. (In Russ.)

Komulainen S. F., Lozovik P. A., Kruglova A. N., Baryshev I. A., Galibina N. A. Assessment of the ecological state of the rivers of the Northern coast of Lake Ladoga by chemical indicators and structure of hydrobiocenoses. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2016;43(3):277–286. (In Russ.). doi: 10.7868/S0321059616030093

Kuznetsov A. B., Gorokhov I. M., Azimov P. Ya., Dubinina E. O. C- and Sr-chemostratigraphic potential of Palaeoproterozoic sedimentary carbonates under conditions of mid-temperature metamorphism: Ruskeala marbles, Karelia. *Petrologiya = Petrology*. 2021;29(2):172–194. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869590321010039

Lozovik P. A., Borodulina G. S. Nitrogen compounds in surface and subterranean waters of Karelia. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2009;36(6):694–704. (In Russ.)

Lozovik P. A., Efremenko N. A. (ed.). Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Kulikova T. P., Martynova N. N. (eds.). Condition of water bodies of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 210 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Potapova I. Yu. Influx of chemical substances with atmospheric precipitation onto the territory of Karelia. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(1):111–118. (In Russ.)

Mustonen A. A., Nokelainen S. I., Nokelainen M. V. Report on geological exploration works and calculation of reserves as of 01.01.57, conducted at the Ruskeala II deposit in the Sortavala District of the KASSR in 1956–57. Kar. TFGI; 1958. (In Russ.)

Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. User's guide to PHREEQC (Version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport,

and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. Denver: U.S. Geological Survey; 1999.

*Samarina V. S. (ed.). Resources and geochemistry of groundwater in Karelia. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1987. 151 p. (In Russ.)*

*Sakharov A. S. Report on the work of the geological exploration party at the Ruskeala 1 deposit in 1940. Kar. TFGI; 1940. (In Russ.)*

*Savitskii A. V., Titov V. K., Mel'nikov V. K. Uranium, thorium, potassium in rocks of Karelia and issues of radioecology. Petrosavodsk: KarRC RAS; 1992. P. 99–113. (In Russ.)*

*Sharov N. V. (ed.). Ladoga Proterozoic structure (geology, deep structure and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 435 p. (In Russ.)*

*Shekov V. A. (ed.). The mining road. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 362 p. (In Russ.)*

*Shekov V. A. Natural risks and monitoring systems: Case study of the mining-industrial heritage objects of Karelia (Ruskeala Mining Park), Russia. Herald of the MSTU. 2021;24(2):214–227. doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-214-227*

*Shvartsev S. L. Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone. 2<sup>nd</sup> ed., rev. and enl. Moscow: Nedra; 1998. 336 p.*

*Smirnova A. G., Rytsareva Z. V. Report on the results of the audit work carried out at the Ruskeala-I marble deposit in 1967-69. (Sortavala District, KASSR). Kar. TFGI; 1969. (In Russ.)*

*Sobolevskii V. P. Geognostic survey of old Finland and description of the Ruskol marble quarries. St. Petersburg; 1839. 140 p. (In Russ.)*

*Sokolov V. A. Geology and lithology of carbonate rocks of the middle Proterozoic of Karelia. Moscow-St. Petersburg; 1963. 183 p. (In Russ.)*

*Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene–Holocene in groundwater stable isotopes (<sup>2</sup>H,<sup>18</sup>O). Quat. Int. 2019;524: 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022*

*Yakutseni V. P. The geology of helium. Leningrad: Nedra; 1968. 232 p. (In Russ.)*

*Yanitskii I. N. Helium survey. Moscow: Nedra; 1979. 96 p. (In Russ.)*

*Поступила в редакцию / received: 22.12.2025; принята к публикации / accepted: 17.03.2026.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Бородулина Галина Сергеевна**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

*e-mail: bor6805@yandex.ru*

### **Токарев Игорь Владимирович**

д-р геол.-мин. наук, главный специалист  
проблемной лаборатории глубинной метагеологии

*e-mail: torarev\_iv@pers.spmi.ru*

### **Медведев Павел Владимирович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник,  
руководитель лаборатории литологии и геохимии

*e-mail: pmedved@krc.karelia.ru*

### **Шеков Виталий Александрович**

канд. техн. наук, заместитель директора  
по научной работе

*e-mail: shekov@krc.karelia.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Borodulina, Galina**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

### **Tokarev, Igor**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Specialist,  
Deep Earth Metageology Research Laboratory

### **Medvedev, Pavel**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher,  
Head of Laboratory

### **Shekov, Vitaly**

Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director for Science