

УДК 556.332.52(571.1)

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ И ГИДРОГЕОХИМИЯ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ГРАНИТНОГО КАРЬЕРА БОРОК

Сухорукова Анна Федоровна^{1,2},
SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

Актуальность исследования определяется необходимостью современной оценки гидрогеологических условий разработки и гидрогеохимии дренажных вод гранитного карьера Борок, расположенного в черте крупного Сибирского мегаполиса – города Новосибирска.

Цель: изучить современный водоприток и особенности химического и радионуклидного состава вод карьера.

Методы. Отбор проб выполнялся в соответствии с общепринятыми методиками. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Результаты. В 2019–2021 гг. были отобраны пробы дренажных вод гранитного карьера Борок и реки Иня (выше и ниже места сброса дренажных вод из карьера). Обобщены данные по водопритокам за последние 70 лет, и обоснована роль основных водоносных горизонтов и атмосферных осадков в обводнении карьера в течение года. Выявлены гидрогеохимические особенности дренажных вод карьера (зон развития роговиков и гранитоидов), включая распределение широкого спектра химических элементов (от Li до U). Воды характеризуются $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na-Mg-Ca}$ и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na-Mg-Ca}$ составом. Величина общей минерализации варьирует в интервале 572–697 мг/дм³, содержание кремния – 0,89–10,53 мг/дм³. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами pH от 7,6 до 8,5; Eh от +150,2 до +261,0 мВ и $O_{2\text{раств.}}$ от 3,6 до 11,5 мг/дм³. Концентрация природных радионуклидов составляет (мг/дм³): ^{238}U ($9,30 \cdot 10^{-3}$ –0,21), ^{232}Th ($1,00 \cdot 10^{-6}$ – $9,62 \cdot 10^{-5}$). Активность радона (^{222}Rn) варьирует в интервале от 1 до 89 Бк/дм³.

Ключевые слова:

Гидрогеологические условия разработки, геохимия дренажных вод, уран, торий, радон, водопритоки, гранитный карьер Борок, город Новосибирск, Западная Сибирь.

Введение

В пределах Новосибирской городской агломерации и в ее окрестностях в настоящее время разрабатывается несколько гранитных карьеров разной степени обводненности – Борок, Мочище, Скала и Новобибево. Известны затопленные карьеры, которые в настоящее время используются в городском хозяйстве в рекреационных целях, – Горский и Тулинский. Несмотря на длительное время их эксплуатации, до настоящего времени практически не проводились исследования химического состава дренажных вод, в том числе распределения в них радионуклидов. Результаты исследований по природным водам города Новосибирска и их радионуклидному составу приведены в работах В.К. Гусева, Е.К. Вериги, Д.А. Новикова, А.Ф. Сухоруковой и др. [1–10].

Содержание радионуклидов в гидросфере Земли варьирует в широких пределах. Проблема радиоактивности вод разрабатываемых месторождений полезных ископаемых и их влиянию на радиэкологическую обстановку посвящено множество работ как российских, так и зарубежных авторов, из последних исследований необходимо отметить публикаций А.А. Конышева, Е.Д. Сидкиной, В.И. Мальковского, G. Manjón, J. Mantero, S. Mishra, S. Mitra, B. Cho, D. Kim, M. Kim, J. Hwang, C. Choo, E.B. Faweya, V.S.P. Adithya, T.A. Przylibski, J. Knežević, C. Yu, F.S. Olise [11–25].

Карьер Борок расположен в южной части Октябрьского района г. Новосибирска, в правом борту р. Иня, в 500 м от места впадения ее в Обь (рис. 1, а). В 200–250 м на юге от него – шоссе и железнодорожная линия, соединяющие г. Новосибирск с Алтайским краем и Кузбассом.

Эксплуатация месторождения началась кустарными разработками еще в конце XIX в. для строительных нужд быстро развивающегося города (тогда еще Ново-николаевска) и Транссибирской железнодорожной магистрали. Официальной датой открытия карьера, который разрабатывался местными организациями для нужд города до 1935 г., затем перешел в систему Наркомата путей сообщения и эксплуатировался Томской железной дорогой, считается 1908 г. Карьер был заложен в холме с сосновым бором, отсюда произошло название Борок. По имеющимся фондовым данным, запасы по категории А составляли в 1950–1980-х гг. прошлого века от 2300 до 4500 тыс. м³, в начале 2000-х гг. – 400–900 тыс. м³. Продукция карьера сертифицирована для производства строительного щебня, декларирована для дорожного строительства. За всю историю его эксплуатации, по грубым подсчетам, добыто более 40 млн т каменного материала.

Несмотря на длительное время разработки гранитных карьеров в черте города, до настоящего времени практически не проводились исследования химиче-

ского состава дренажных вод, в том числе распределения в них радионуклидов. В 70–80-х гг. прошлого века гидрогеологическими партиями и отрядами НГПЭ ПГО «Новосибирскгеология» был проведен большой объем поисковых работ на минеральные радоновые воды в городе и его окрестностях. Выявлены 12 месторождений радоновых вод. Получены первые данные по химическому составу подземных вод различных горизонтов, содержаниям радионуклидов в водах и вмещающих породах, которые не были опубликованы в открытой печати, а хранятся в фондах Территориального геологического управления по Новосибирскому округу.

Научный интерес по изучению распределения и форм миграции радиоактивных элементов в природных подземных водах существенно вырос за последнее десятилетие. Исследователи из более чем 40 стран мира (Европы, Америки, Восточной и Южной Азии, Среднего Востока, Африки), где распространены массивы гранитоидов, активно публикуют новые данные по содержаниям урана и радона в зависимости от состава водовмещающих пород и окислительно-восстановительных условий. Проводится оценка характеристик регионального фона. Особое внимание уделяется возможным негативным последствиям воздействия радионуклидов на загрязнение водных ресурсов и здоровье человека [6, 15–17, 20–23, 26–28].

Фактический материал и методика исследования

В рамках настоящих исследований были обобщены материалы ООО «Горно-добывающая компания» (г. Новосибирск) по водопритокам в карьер Борок и составлена электронная база данных общим объемом более 1500 записей. Во время полевых работ 2019–2020 гг. отобрано 17 проб воды. Опробованы все выходы подземных вод на поверхность в бортах карьера, в старом карьере, зумпфах, служащих накопителями воды, скважинах, пройденных для взрывных работ, а также поверхностные вод реки Иня выше и ниже места сброса дренажных вод карьера (рис. 1). Во время экспедиционных работ непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью оборудования (Hanna HI9125, кислородомер АКПМ-1-02Л) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Измерение содержаний радона в природных водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Лабораторное изучение химического состава вод проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Данные по количеству атмосферных осадков и среднесуточной температуре за анализируемый период были взяты с информационного портала «Погода и климат» [29].

Результаты исследования и обсуждение

Геологическое строение и гидрогеологические условия

Месторождение карьер Борок приурочено к юго-восточному контакту Новосибирского верхнепалеозойского массива гранитоидов ($\epsilon tP_3 - T_1P_2$) с песчано-

глинистыми сланцами пачинской свиты верхнего девона ($D_3p\epsilon$), которые в результате контактового метаморфизма превращены в роговики [30]. Гранитоиды и роговики пронизаны многочисленными дайками кислого состава, реже дайками лампрофиров. Толща разбита несколькими системами трещин, гранитоиды имеют глыбовую или столбчатую отдельность, в роговиках плитчатая отдельность, отмечены зоны интенсивной трещиноватости. Контакт гранитоидов с роговиками общего северо-восточного простирания, линия неправильная, изрезанная, фистончатая.

Среди гранитоидов преобладают биотит-амфиболовые граниты, субщелочные двуполевошпатовые порфировидные граниты, лейкограниты. В минеральном составе пород содержание кварца от 25 до 35 %, плагиоклаза от 20 до 45 %, калишпата от 20 до 40 %, биотита от 3 до 5 %, роговая обманка до 5 %. Акцессорные минералы: сфен, циркон, апатит, рутил, ортит. Роговики – темно-серые, почти черные, или светло-серые, слабо-зеленоватые тонкозернистые, очень плотные породы с шероховато-раковистым изломом. Структура гетерогранобластовая. Темные разности имеют существенно кварц-биотитовый состав, светлые – кварц-диопсидовый, встречаются роговообманковые разновидности.

Палеозойские породы до начала эксплуатации месторождения практически на всей площади были перекрыты осадками четвертичного возраста первой надпойменной и пойменной террас рек Обь и Иня мощностью до 5–12 м. К настоящему времени в контуре разведки полностью удалены рыхлые, скальные вскрышные породы и породы верхней трещиноватой зоны, связанной с процессами выветривания.

В пределах месторождения гранитоиды имеют зональное строение, в направлении к контакту происходит смена биотит-роговообманковых гранитов на гранодиориты, а иногда и на кварцевые диориты. Восточную часть месторождения составляют роговообманковые роговики (рис. 1, б). Соотношение этих петрографических разновидностей пород (гранитоидов и роговиков) на текущий момент в составе полезной толщи, исходя из площадного распространения, составляет 43:57 %.

В процессе разведки и эксплуатации месторождения карьер Борок проводился крайне малый объем гидрогеологических исследований, в 70-е годы прошлого века определялись фильтрационные свойства пород и водопритоки в карьер, получены единичные значения по концентрации радона и химического состава воды. Первая гидрогеологическая характеристика месторождения была дана в 1955 г. в рамках отчета о геологоразведочных работах под руководством Г.В. Баландина. Исследования карьера Борок 70–80-х гг. прошлого века связаны с именами геологов и гидрогеологов Новосибирской геологопоисковой экспедиции (А.В. Павлов, В.И. Грязнова, Г.Т. Голодяк, В.Н. Лукьяшко, Л.Е. Ударцева, Г.Ф. Вавилихин и другие).

В пределах карьера выделяется водоносный горизонт аллювиальных четвертичных отложений (супеси, суглинки и песчано-гравийно-галечниковые отложе-

ния). Режим грунтовых аллювиальных вод находится в прямой зависимости от режима рек Иня и Обь и количества выпадающих атмосферных осадков. По результатам опытных работ удельные дебиты скважин составляют 0,1–0,6 л/с при среднем коэффициенте фильтрации 4,8 м/сут и средней водопроницаемости 47,0 м²/сут.

Ниже залегает водоносный горизонт палеозойских интрузивов, представленный в основном гранитами. Воды трещинно-жильные, напорные. По результатам

опытных откачек палеозойские образования характеризуются невысокой водообильностью со средним удельным дебитом скважин 0,02 л/с. Средние величины коэффициента фильтрации составляют 1,4 м/сут, а коэффициента водопроницаемости – не более 1 м²/сут. Питание осуществляется посредством межпластовых перетоков из вышележащего четвертичного горизонта, дренажа из реки Иня и атмосферными осадками.

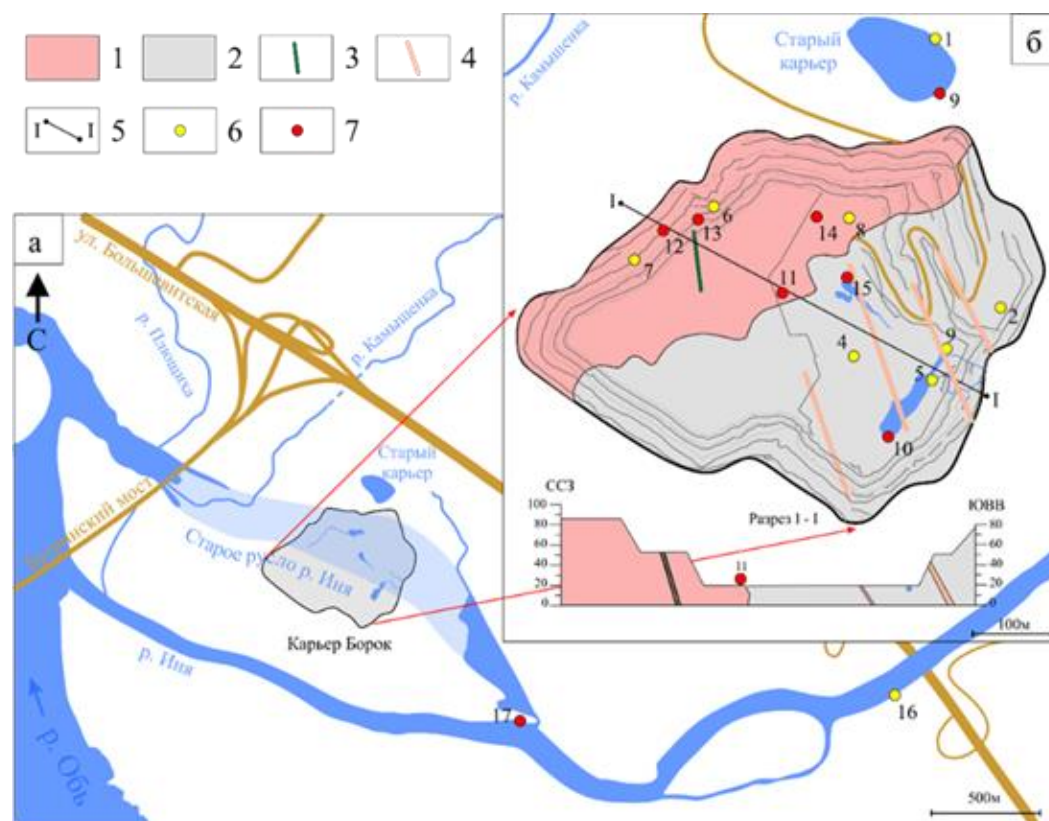


Рис. 1. Местоположение карьера Борок (а) и схема геологического строения (б). 1 – гранитоиды; 2 – рогамики; 3 – лампрофиты; 4 – гранодиориты; 5 – линия разреза; 6 – точки отбора проб 1–8, 16 (2019 г.): 1 – старый карьер (северная часть), 2 – источник I, 3 – источник II, 4 – зумпф I, 5 – источник III, 6 – источник IV, 7 – источник V, 8 – зумпф II, 16 – река Иня; 7 – точки отбора проб 9–15 (2020 г.): 9 – старый карьер (восточная часть), 10 – источник VI, 11 – скважина I, 12 – источник VII, 13 – источник VIII, 14 – зумпф III, 15 – зумпф IV, 17 – река Иня

Fig. 1. Location of the Borok quarry (a) and the scheme of the geological structure (b). 1 – granitoids; 2 – hornfelses; 3 – lamprophyres; 4 – granodiorites; 5 – cut line; 6 – sampling points 1–8, 16 (2019): 1 – old quarry (northern part), 2 – source I, 3 – source II, 4 – sump I, 5 – source III, 6 – source IV, 7 – spring V, 8 – sump II, 16 – river Inya; 7 – sampling points 9–15 (2020): 9 – old quarry (eastern part), 10 – source VI, 11 – well I, 12 – source VII, 13 – source VIII, 14 – sump III, 15 – sump IV, 17 – river Inya

За более чем 100 летнюю эксплуатацию карьера его площадь и глубина существенно увеличились, что привело к значительному изменению гидрогеологических условий месторождения. Если в начале прошлого века оно представляло собой останец, возвышающийся над окружающей поверхностью, то в настоящее время это карьер глубиной более 80 м (абсолютная отметка дна рабочей зоны +10 м). Также значительно увеличилась площадь карьера (более чем в 10 раз), если в 1954 г. она составляла около 27300 м² при глубине карьера 22 м, то в 2020 г. уже 345000 м². В настоящее время старый карьер используется как водосборник, из которого ведется от-

качка и сброс дренажных вод в искусственно образованный ручей, впадающий в реку Иня. В связи с необходимостью увеличения добычи каменного материала в 1988 г. русло реки Иня было перенаправлено (приблизительно 500 м на юго-запад) в протоку Курья, что существенно изменило гидрогеологическую обстановку в зоне активного водообмена (рис. 1, а). До отвода русла реки Иня рассчитанные притоки в карьер были выше в 2–2,5 раза, по сравнению с фактическими притоками в 2019–2020 гг. Это свидетельствует об уменьшении доли вод аллювиального водоносного горизонта в общем водопри- токе в настоящее время.

Современные водопритоки в карьер

С первых лет эксплуатации карьера существует необходимость постоянных откачек воды; в послевоенном 1947 г. работа карьера была приостановлена и карьер был полностью затоплен. Гидрогеологические условия карьера Борок достаточно сложные, и питание водоносных горизонтов определяется дренажом из реки Иня и количеством атмосферных осадков. Главным фактором, определяющим основные черты режима подземных вод на месторождении, является гидрологический режим, свойственный реке Иня.

В период с 1950 по 1980 гг. предпринимались попытки оценить роль трещинно-жильных вод палеозойских гранитов, четвертичного водоносного горизонта и атмосферных осадков вод в общем объеме дренажных вод. Приток за счет атмосферных осадков оценивался как поверхностный сток при сформированной водосборной площади и среднегодовом количестве осадков. При этом четких критериев по разделению объемов притока не было разработано.

Реального учета откачиваемых объемов вод не велось вплоть до 2019 г. (рис. 2). Поэтому анализ расчи-

танных объемов вод, учитываемых в прошлые годы при эксплуатации месторождения, показал значительное завышение этих величин по сравнению с реальными (более чем в два раза). Особенно сильно завышение прослеживалось в летние месяцы. Автоматический учет водопритоков 2019–2020 гг. (по данным ООО «Горнодобывающая компания») показал, что реальные цифры варьируют в пределах 2,24–2,35 млн м³ в год.

Принимая во внимание современные материалы по объемам водопритоков в карьер, была выполнена вероятностная оценка доли трещинно-жильных вод в его обводнении. В холодный период года (с ноября по март) водоприток в карьер за счет атмосферных осадков в виде дождя отсутствовал (рис. 2), а инфильтрация из водоносного горизонта аллювиальных четвертичных отложений была минимальной. Средний водоприток в это время составлял около 5100 м³/сут, и его можно считать поступающим из трещиноватых палеозойских пород. С мая по октябрь объемы дренажных вод увеличились до 6400 м³/сут, и разницу (в среднем 1300 м³/сут) можно отнести ко вкладу атмосферных осадков и вод четвертичных отложений.

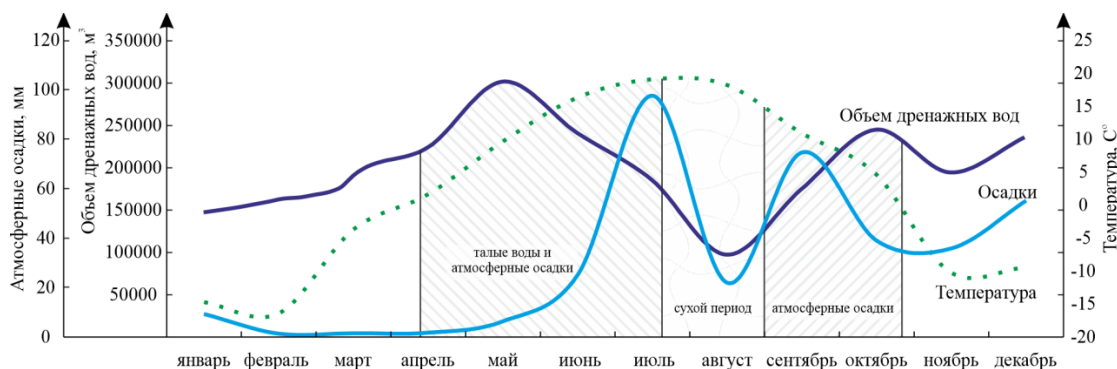


Рис. 2. Объемы дренажных вод карьера Борок в соответствии с количеством атмосферных осадков и среднесуточной температурой в 2019 г.

Fig. 2. Borok quarry drainage water volumes in accordance with the amount of precipitation and average daily temperature in 2019

По данным И.В. Фёклиной длительная эксплуатация карьера привела к формированию депрессионной воронки с радиусом влияния не менее 3200 м, деформированной в восточном-северо-восточном направлении (в противоположную сторону от рек Иня и Обь). Как показывают результаты мониторинговых наблюдений, значительных изменений в существующем режиме вод, связанных с четвертичными отложениями и породами палеозоя, при дальнейшей эксплуатации карьера не ожидается. В настоящее время объем карьера составляет 17,7 млн м³. При среднегодовом водопритоке в размере 2,3 млн м³ карьер без постоянных откачек полностью заполнится водой приблизительно за 8 лет.

Геохимия дренажных вод

Рассмотрим особенности дренажных вод карьера Борок. В результате анализа полученных данных по химическому и радионуклидному составу выделены следующие группы – трещинно-жильные воды зоны распространения гранитоидов (группа I), зоны распространения роговиков (группа II), а также воды старого

накопительного карьера (группа III) (табл. 1, 2), где по системе временных трубопроводов накапливается постоянно откачиваемая вода. Здесь же приведен состав вод реки Иня (группа IV) выше и ниже по течению от места впадения искусственного ручья, по которому сбрасываются дренажные воды из карьера.

Группа I характеризуется Cl-SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca и SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca составом с величиной общей минерализации от 572 до 652 мг/дм³ и содержанием кремния от 4,8 до 10,5 мг/дм³, железа в среднем 0,15 мг/дм³, перманганатной окисляемостью от 0,8 до 2,1 мг/дм³. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами pH от 7,6 до 8,5; Eh от +150,2 до +244,7 мВ и O₂раств. от 3,9 до 11,5 мг/дм³. Содержания радионуклидов в водах группы I составляют (мг/дм³): ²³⁸U от 0,9·10⁻² до 10,1·10⁻² и ²³²Th от 1,00·10⁻⁶ до 9,6·10⁻⁵ (табл. 2, рис. 3). ²³²Th/²³⁸U отношение в водах изменяется в интервале от 1,0·10⁻⁴ до 5,8·10⁻³ при среднем 3,1·10⁻⁴. Активность радона варьирует в пределах от 16 до 89 Бк/дм³. При выполненных в 70–80-е гг. прошлого

века единичных замерах активности радона значения составляли 30–140 Бк/дм³. Невысокую активность ²²²Rn в водах следует связывать с местона-

хождением карьера Борок в зоне контакта Новосибирского гранитоидного массива с песчано-глинистыми сланцами.

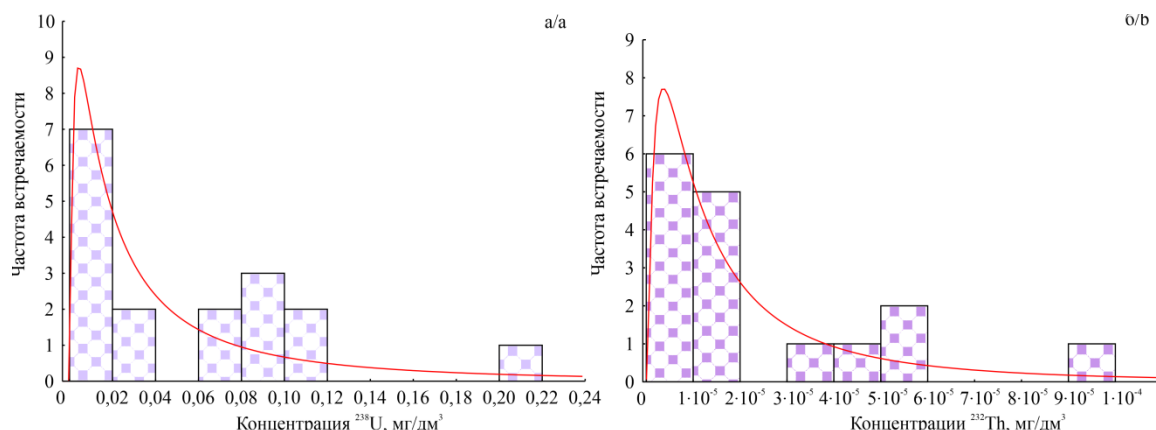


Рис. 3. Распределение U и Th в дренажных водах карьера Борок

Рис. 3. Distribution of U and Th in the drainage waters of the Borok quarry

Группа II – это воды с Cl-SO₄-HCO₃ Mg-Na-Ca составом и средними значениями (мг/дм³): минерализации 665, концентрациями кремния 5,4 и железа 0,12. Параметры геохимической среды этой группы также отвечают окислительной обстановке, при этом величина pH практически не меняется и в среднем составляет 8,2; Eh варьирует от +225,2 до +256,3 мВ и O₂раств. от 8,5 до 11,2 мг/дм³. Близкий химический состав дренажных вод

карьера объясняется большим влиянием реки Иня. Необходимо отметить существенное различие в концентрациях урана, тория и радона в них (табл. 2). При этом в трещинно-жильных водах зоны распространения роговиков концентрации радионуклидов значительно ниже (по урану в 2,5, а по торию в 4 раза), чем в водах первой группы. Активность радона в водах не превышает 38 Бк/дм³ при среднем значении 15 Бк/дм³.

Таблица 1. Химический состав вод карьера Борок и реки Иня

Table 1. Chemical composition of the waters of the Borok quarry and the Inya River

№ на рис. 1 No. in Fig. 1	Дата отбора Selection date	pH	Eh, мВ mV	O ₂ , мг/дм ³ mg/dm ³	П.ок.	Элементы, мг/дм ³ /Elements, mg/dm ³											M, мг/дм ³ mg/dm ³	Химический тип ** Chemical type **
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Si ⁴⁺	Fe ²⁺			
Трещинно-жильные воды зоны распространения гранитоидов/Fissure-vein waters of the zone of distribution of granitoids																		
6	21.05.2019	8,3	244,7	11,5	1,6	99	22,0	34,6	2,7	388	58	5,1	1,7	6,0	0,10	630	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
7	21.05.2019	8,5	215,8	11,1	1,4	95	18,0	31,6	5,0	386	61	5,3	1,4	5,0	0,15	603	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
8	21.05.2019	7,8	222,3	9,4	1,6	84	18,0	36,3	3,9	364	54	5,1	7,1	6,9	0,10	572	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
11	06.07.2020	7,6	192,6	4,1	2,1	95	21,9	49,9	6,2	320	118	27,6	17,2	10,5	0,11	663	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
12	06.07.2020	7,6	222,4	3,9	1,9	95	24,9	41,7	2,3	346	91	27,0	4,5	7,9	0,07	643	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
13	06.07.2020	7,9	209,7	8,9	1,3	89	20,7	36,3	4,7	331	56	36,7	1,8	4,8	0,11	582	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
14	06.07.2020	7,9	201,7	7,5	1,0	101	21,9	40,9	4,5	352	77	40,8	5,4	6,6	0,17	652	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
15	06.07.2020	8,0	150,2	7,1	0,8	91	20,7	43,3	3,9	272	116	33,9	17,0	7,1	0,11	605	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
Среднее значение Mean		7,9	215,6	8,1	1,5	93	21,0	39,0	4,2	345	79	22,7	7,0	6,9	0,15	619	—	
Трещинно-жильные воды зоны распространения роговиков/Fissure-vein waters of the zone of distribution of hornfelses																		
2	21.05.2019	8,1	225,2	10,6	1,6	109	25,0	41,2	4	371	107	32	6,8	0,89	0,12	696	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
3	21.05.2019	8,3	256,3	10,9	1,0	102	18,5	54,4	3,9	378	90	33,8	5,95	7,07	0,11	687	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
4	21.05.2019	8,0	233,3	9,61	1,2	102	25,0	37,6	3,1	366	89	34,5	5,15	5,89	0,11	662	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
5	21.05.2019	8,3	246,5	11,2	1,0	90	20,7	44,7	3,6	348	82	28,1	1,72	6,7	0,10	619	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
10	06.07.2020	8,2	256,3	8,5	1,1	94	24,4	37,2	3,86	308	113	28,7	0,92	6,7	0,18	663	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
Среднее значение Mean		8,2	227,0	9,7	1,2	99	22,7	43,0	3,7	354	96	31	4,0	5,45	0,12	665	—	
Воды старого карьера (накопительного)/Waters of the old quarry (accumulative)																		
1	21.05.2019	8,2	261,0	9,3	1,6	101	22,0	49,6	4,2	378	96	37,6	8,56	6,98	0,17	697	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
9	06.07.2020	7,6	194,3	3,6	0,80	97	25,6	44,0	4,65	319	111	35,6	14,1	7,74	0,13	660	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Na-Ca	
Воды реки Иня/Waters of the Inya river																		
16	04.05.2019	8,5	235,0	13,8	2,7	28	14,0	28,5	1,34	174	33,6	7,8	0,13	0,14	0,03	286	SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca -Na	
17	06.07.2020	8,6	165,6	7,6	1,1	51	18,3	78,7	1,95	354	48,3	18,5	0,09	1,94	0,12	576	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca -Na	

Примечание: «–» отсутствие данных; * – название химического типа дано по классификации С.А. Шукарева (в формулу добавлены макрокомпоненты с содержанием >10 %-экв).

Note: «–» data missing; * – name of the chemical type is given according to the classification of S.A. Shchukarev (macro-components with a content of >10 % eq have been added to the formula).

Воды старого накопительного карьера (группа III) пресные и отвечают $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Na-Ca составу. Химический состав и концентрация радионуклидов существенно меняется в зависимости от того, в какой части карьера ведутся работы и откуда поступают воды.

Воды реки Иня отличаются $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Ca-Na и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Na составом с величиной общей минерализации 286–576 мг/дм³ и содержанием кремния 0,14–1,94 мг/дм³. Параметры среды также отвечают окислительной обстановке с величинами pH 8,5–8,6; Eh +165,6–+235,0 мВ и $\text{O}_{2\text{раств}}$ 7,6–13,8 мг/дм³. Состав речных вод свидетельствует об активном накоплении в водах натрия (до 78,7 мг/дм³) за счет процессов антропогенного загрязнения в черте города (табл. 1, 2) [20]. Активность радона в речных водах не превышает 2 Бк/дм³. Концентрации урана практически одинаковы в речных водах выше и ниже по течению от места сбора карьерных вод, а тория на порядок выше. Выше по течению $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение составляет $1,32 \cdot 10^{-3}$, а ниже – $5,79 \cdot 10^{-3}$.

Радионуклидный состав дренажных вод карьера Борок

Анализ имеющихся фондовых материалов показал, что ранее радионуклидный состав дренажных вод карьера практически не изучался и содержания тория не определялись. В отчетных материалах за 1976 и 1983 гг. приводятся данные по концентрациям урана, которые варьировали в широких пределах от $1,8 \cdot 10^{-4}$ до 0,21 мг/дм³. Необходимо отметить, что радиационный фон закономерно повышается в той части карьера, где вскрыты гранитоиды, достигая максимального значения 50 мкР/ч. На юго-западе, в области распространения

роговиков, среднее значение составляет 21 мкР/ч, а за пределами карьера на берегах реки Иня – не более 12 мкР/ч (табл. 2). Данные по распределению тория для всех групп рассматриваемых вод получены впервые.

Концентрации содержания урана в водах гранитных массивов других регионов страны и мира опубликованы в работах А.Н. Токарева, Н.А. Титаевой, Л.П. Рихванова, С.Л. Шварцева. Содержание урана, по данным вышеуказанных авторов, в водах равнинных рек составляет от $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, в зонах распространения кислых магматических пород – $2 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³. В публикациях иностранных авторов основное внимание уделяется концентрации радона в водах гранитных массивов, использующихся для питьевого водоснабжения населения.

Для оценки количества выносимого дренажными водами карьера урана и тория наибольший интерес представляют трещинно-жильные воды гранитоидов, для которых определены максимальные концентрации урана и тория (табл. 2). В течение двух полевых сезонов были опробованы все выходы подземных вод на территории карьера (рис. 4). В изученные объекты входили: старый накопительный карьер, который служит в настоящее время местом сбора вод; зумпфы глубиной от 3 до 5 м; источники (выходы вод в виде водопадов) смешанного происхождения из бортов карьера; скважины глубиной до 11 м, пройденные для взрывных работ. По периметру карьера образуются временные ручьи, собирающиеся в временных зумпфах, из которых проводится откачка воды.

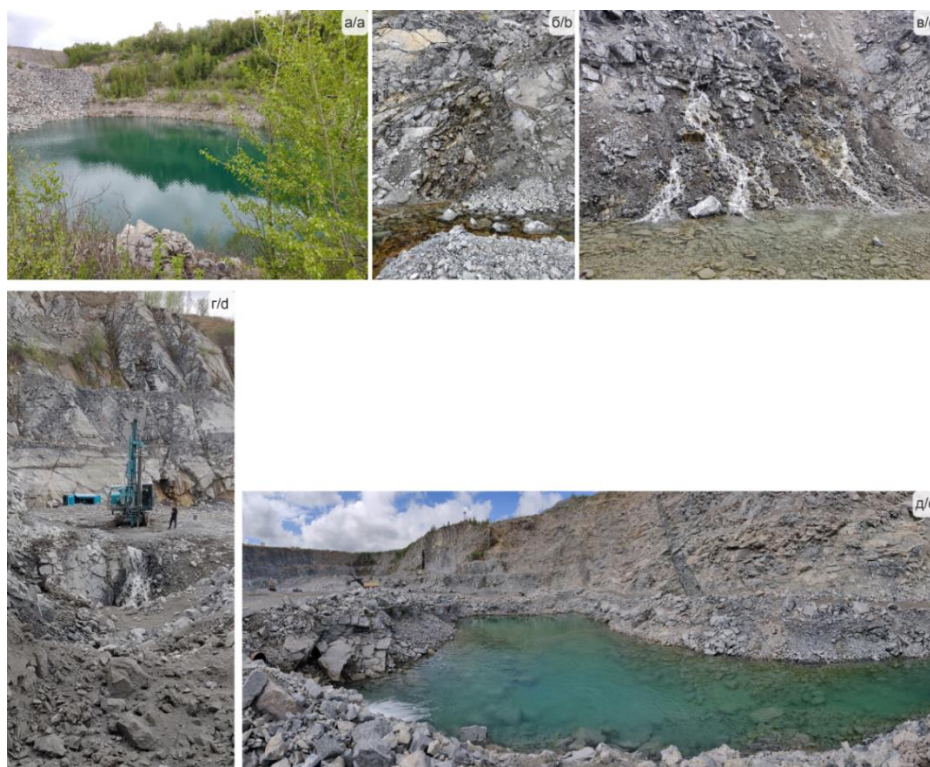


Рис. 4. Места отбора дренажных вод карьера Борок: старый накопительный карьер (а); выходы воды в виде источников в бортах и дне карьера (б–г); зумпф (д)

Fig. 4. Borok quarry drainage water sampling points: old accumulative quarry (a); water outlets in the form of sources in the sides and bottom of the quarry (b–d); sump (e)

Таблица 2. Радионуклидный состав дренажных вод карьера Борок и реки Иня

Table 2. Radionuclide composition of drainage waters of the Borok quarry and the Inya river

№ на рис. 1 No. in Fig. 1	Радиационный фон, мкР/ч Radiation background, $\mu\text{R/h}$	pH	Eh, мВ/мВ	O ₂ раств.	U	Th	Th/U	Rn, Бк/дм ³ Bk/dm ³
Трещинно-жилые воды гранитоидов/Fissure-vein waters of granitoids								
6	26	8,3	244,7	11,5	0,9·10 ⁻²	6,5·10 ⁻⁶	7,2·10 ⁻⁴	18
7	28	8,5	215,8	11,1	1,0·10 ⁻²	1,0·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁴	16
8	37	7,8	222,3	9,4	8,7·10 ⁻²	1,0·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁴	55
11	48	7,6	192,6	4,1	21,1·10 ⁻²	5,5·10 ⁻⁵	2,6·10 ⁻⁴	88
12	50	7,6	222,4	3,9	10,1·10 ⁻²	3,9·10 ⁻⁵	3,9·10 ⁻⁴	43
13	34	7,9	209,7	8,9	7,2·10 ⁻²	1,5·10 ⁻⁵	2,1·10 ⁻⁴	89
14	40	7,9	201,7	7,5	9,2·10 ⁻²	9,6·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁴	51
15	39	8,00	150,2	7,1	7,9·10 ⁻²	4,6·10 ⁻⁵	5,8·10 ⁻⁴	57
Среднее/Mean	38	7,9	207,4	7,9	8,3·10 ⁻²	4,2·10 ⁻⁵	3,1·10 ⁻⁴	53
Трещинно-жилые воды роговиков/Fissure-vein waters of hornfelses								
2	14	8,1	225,2	10,6	1,1·10 ⁻²	1,2·10 ⁻³	1,1·10 ⁻³	19
3	17	8,3	256,3	10,9	8,0·10 ⁻²	9,9·10 ⁻⁶	1,2·10 ⁻⁴	4
4	14	8,0	233,3	9,6	3,8·10 ⁻²	1,2·10 ⁻⁵	3,2·10 ⁻³	12
5	18	8,3	246,5	11,2	3,0·10 ⁻²	5,4·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁴	1
10	23	8,2	256,3	8,5	1,2·10 ⁻²	–	–	38
Среднее/Mean	17	8,2	243,5	10,2	3,4·10 ⁻²	1,0·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻³	15
Воды старого карьера (накопительного)/Waters of the old quarry (accumulative)								
1	20	8,2	261,0	9,3	9,3·10 ⁻²	5,1·10 ⁻⁵	5,5·10 ⁻⁴	17
9	21	7,6	194,3	3,6	11,6·10 ⁻²	1,4·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁴	45
Воды реки Иня/Waters of the Inya river								
16	11	8,5	235,0	13,8	2,32·10 ⁻³	3,1·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻³	0,1
17	12	8,6	165,6	7,6	2,40·10 ⁻³	1,4·10 ⁻⁵	5,8·10 ⁻³	0,1

Результаты автоматического учета дренажных вод и актуальные данные по их химическому составу позволили впервые выполнить оценку объемов выносимых ими природных радионуклидов. Так, средние объемы дренажных вод составляют 2,3 млн м³ в год, а концентрации урана – 6,58·10⁻² мг/дм³ и тория – 2,67·10⁻⁵ мг/дм³. При этом условия ежегодные объемы выносимого урана и тория можно оценить как 151,4 и 61,4 кг, соответственно. При этом следует отметить, что загрязнения радиоактивными элементами реки Иня не наблюдается. За счет процессов смешения ее вод с дренажными концентрации ²³⁸U варьируют от 2,32·10⁻³ до 2,40·10⁻³ мг/дм³, а ²³²Th – от 3,08·10⁻⁶ до 1,39·10⁻⁵.

Заключение

В заключении необходимо отметить, что впервые за более чем вековую историю разработки карьера Борок проанализированы гидрогеологические условия и получены актуальные сведения о геохимии дренажных вод. Произошло существенное изменение гидрогеологических условий месторождения за счет переноса русла реки Иня и снижение доли вод аллювиального водоносного горизонта и дренажа из самой реки в общем обводнении карьера. Как показал опыт прошлых лет, эксплуатация карьера без постоянной откачки поступающих вод невозможна.

Установлено, что основной объем воды, поступающий в карьер, относится к трещинно-жилым водам палеозойских гранитов, при этом их питание происходит за счет аллювиальных вод и вод атмосферных осадков, что определяет их разнообразие по химическому составу. Преобладают воды Cl-SO₄-

HCO₃ Na-Mg-Ca и SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 572 до 697 мг/дм³ и содержанием кремния от 0,89 до 10,53 мг/дм³. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами pH от 7,6 до 8,5; Eh от +150,2 до +261,0 мВ и O₂раств. от 3,4 до 11,4 мг/дм³.

Максимальные содержания природных радионуклидов составляют: урана до 0,21 мг/дм³, тория до 9,62·10⁻⁵ мг/дм³, а активность радона варьирует в интервале от 1 до 89 Бк/дм³. Невысокие концентрации ²²²Rn в водах следует связывать с местонахождением карьера Борок в зоне контакта Новосибирского гранитоидного массива с песчано-глинистыми сланцами. При этом следует отметить, что загрязнения радиоактивными элементами реки Иня не наблюдается. За счет процессов смешения ее вод с дренажными концентрациями ²³⁸U варьируют от 2,32·10⁻³ до 2,40·10⁻³ мг/дм³, а ²³²Th – от 3,08·10⁻⁶ до 1,39·10⁻⁵ мг/дм³.

Данные по радионуклидному составу дренажных вод гранитного карьера Борок не противоречат ранее опубликованным обобщениям по этому вопросу, а полученные впервые концентрации урана и тория в водах Новосибирского гранитного массива позволят в будущих исследованиях обосновать картину природы радиоактивности подземных вод Новосибирской городской агломерации.

Полевые и аналитические работы по изучению химического состава природных вод выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014, работы по исследованию литолого-минералогических особенностей горных пород – при поддержке проекта Российского научного фонда № 22-17-20029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вериги Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые дан-

ные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – 1979. – № 14. – С. 47–51.

2. Гусев В.К., Вериги Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение

- природных условий под влиянием деятельности человека. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 99–107.
3. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Зельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
 4. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Ф. Сухорукова, Т.В. Корнеева, Р.М. Каменова-Тоцева, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
 5. Изотопно-геохимические особенности проявления слабарадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
 6. Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. – Томск, 4–8 июня 2013. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 461–464.
 7. Groundwater composition near the nickel-copper smelting industry on the Kola Peninsula, central Barents Region (NW Russia and NE Norway) / P. De Caritat, S. Danilova, Ø. Jaeger, C. Reimann, G. Storø // Journal of Hydrology. – 1998. – V. 208. – P. 92–107.
 8. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in Radon Waters of the Zaelsovsky field (The Southern Part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1172. – № 1. – № 012096.
 9. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1451. – № 012007.
 10. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – № 100674.
 11. Особенности поведения химических элементов в системе вода–порода района разрабатываемого карьера буттового камня в Питкярантском рудном районе (Карелия) / А.А. Конышев, Е.С. Сидкина, Е.А. Солдатова, Д.Н. Догадкин, И.Н. Громяк // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 7–19.
 12. Анализ коллоидных форм переноса урана подземными водами на U–Mo-месторождениях Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье) / В.И. Мальковский, В.А. Петров, Ю.П. Диков, Е.В. Александрова, Я.В. Бычкова, А.В. Мохов, Л.С. Шулик // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 454. – № 1. – С. 81–83.
 13. Замана Л.В., Чель Л.П. Геохимия дренажных вод горнорудных объектов вольфрамового месторождения месторождения Бом-Горхом (Забайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22. – С. 1–7.
 14. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages / G. Manjón, J. Mantero, I. Vioque, J. Galván, I. Díaz-Francés, R. García-Tenorio // Chemosphere. – 2019. – V. 223. – P. 536–543.
 15. Mishra S., Maity S., Pandit G.G. Estimation of distribution coefficient of natural radionuclides in soil around uranium mines and its effect with ionic strength of water // Radiation Protection Dosimetry. – 2012. – V. 152. – № 1–3. – P. 229–233.
 16. Assessment of radon (222Rn) activity in groundwater and soil-gas in purulia district, west Bengal, India / S. Mitra, S. Chowdhury, J. Mukherjee, S. Sutradhar, S. Mondal, C. Barman, A. Deb // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2021. – V. 330 (3). – P. 1331–1338. DOI: 10.1007/s10967-021-07989-1
 17. Hydrogeochemical characteristics of uranium and radon in groundwater from the Goesan area of the Ogcheon metamorphic belt (OMB), Korea / B. Cho, D. Kim, M. Kim, J. Hwang, C. Choo // Sustainability (Switzerland). – 2021. – V. 13 (20). DOI: 10.3390/su132011261
 18. Hwang J., Kim S.W. Occurrence of uranopolyrase in pegmatite related to a Jurassic granite pluton in Changwon, South Korea: mineral chemistry and texture of a potential source of uranium and radon in a granite aquifer // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80 (14). DOI: 10.1007/s12665-021-09766-5
 19. Radiological implication of 222Rn concentrations in waters from quarries environs, correlation with 226Ra concentrations and rocks geochemistry / E.B. Faweya, O.A. Agbetuyi, A.O. Talabi, T. Adewumi, O. Faweya // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14 (11). DOI: 10.1007/s10967-022-08240-1
 20. Health risk implication and spatial distribution of radon in groundwater along the lithological contact in south India / V.S.P. Adithya, S. Chidambaram, M.V. Prasanna, S. Venkatramanan, K. Tirumalesh, C. Thivya, R. Thilagavathi // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2021. – V. 80 (1). – P. 308–318.
 21. 222Rn concentration in groundwaters circulating in granitoid massifs of Poland / T.A. Przylibski, E. Domin, J. Gorecka, A. Kowalska // Water (Switzerland). – 2020. – V. 12 (3). DOI: 10.3390/w12030748
 22. Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach / J. Knežević, P. Kuzmanović, D. Mrdja, N. Todorović, I. Bikit, J. Hansman // Journal of Radiological Protection. – 2020. – V. 40 (2). – P. 596–611.
 23. Radon concentrations in the community groundwater system of South Korea / B.W. Cho, H.K. Kim, M.S. Kim, J.H. Hwang, U. Yoon, S.Y. Cho, C.O. Choo // Environmental Monitoring and Assessment. – 2019. – V. 191. DOI: 10.1007/s10661-019-7301-y
 24. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton / C. Yu, T. Berger, H. Drake, Z. Song, P. Peltola, M.E. Åström // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 663. – P. 16–28.
 25. Olise F.S., Akinagbe D.M., Olasogba O.S. Radionuclides and radon levels in soil and ground water from solid minerals-hosted area, south-western Nigeria // Cogent Environmental Science. – 2016. – V. 2 (1). DOI: 10.1080/23311843.2016.1142344
 26. Рихванов Л.П. Радиоактивность и радиоактивные элементы в гидросфере // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 549–557.
 27. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 430 с.
 28. Бахур А.Е. Интерпретация природных и техногенных радиоактивных аномалий в объектах окружающей среды // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 7. – С. 58–62.
 29. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=29638&bday=15&fday=%D0%9F%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%8C&amonth=12&ayear=2020&bot=2> (дата обращения 15.02.2022).
 30. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44. Новосибирск. Объяснительная записка / Г.А. Бабин, А.И. Черных, А.Г. Головина, С.В. Жигалов, С.С. Долгушин, Е.В. Ветров, Т.В. Кораблева, Н.А. Бодина, Н.А. Светлова, Г.С. Федосеев, А.П. Хилько, В.А. Епифанов, Ю.И. Лоскутов, И.Ю. Лоскутов, М.В. Михаревич, Е.А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.

Поступила 20.04.2022 г.

Информация об авторах

Сухорукова А.Ф., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

UDC 556.332.52(571.1)

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF DEVELOPMENT AND HYDROGEOCHEMISTRY OF DRAINAGE WATER OF THE BOROK GRANITE QUARRY

Anna F. Sukhorukova^{1,2},
SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3/6, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the study is determined by the need for a modern assessment of the hydrogeological conditions of development and hydrogeochemistry of drainage waters of the Borok granite quarry, located within the boundaries of a large Siberian metropolis – the city of Novosibirsk.

The aim of the research is to study the features of the chemical composition and evaluate the annual volumes of uranium and thorium carried out by drainage waters.

Methods. Sampling was carried out in accordance with generally accepted methods. Laboratory study of the chemical composition by titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry was carried out at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the TPU School of Natural Resources.

Results. During 2019–2021, the study of the geochemical features of the drainage waters of the Borok granite quarry and the Inya River (above and below the drainage water discharge site) was carried out. The data on water inflows for the last 70 years are summarized and the role of the main aquifers and atmospheric precipitation in the watering of the quarry during the year is substantiated. The hydrogeochemical features of the quarry drainage waters were revealed, including the distribution of a wide range of chemical elements (from Li to U). Waters are characterized by Cl-SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca and SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca composition with TDS from 572 to 697 mg/dm³ and the content of silicon from 0.89 to 10.53 mg/dm³. The environmental parameters correspond to oxidizing geochemical environment with pH values from 7.6 to 8.5; Eh from +150.2 to +261.0 mV and O_{2dissolved} from 3.6 to 11.5 mg/dm³. The contents of natural radionuclides are (mg/dm³): ²³⁸U (9.3·10⁻³–0.2), ²³²Th (1.0·10⁻⁶–9.6·10⁻⁵). The activity of radon (²²²Rn) varies from 1 to 89 Bq/dm³.

Key words:

Hydrogeological conditions of development, drainage water geochemistry, uranium, thorium, radon, water inflows, Borok granite quarry, Novosibirsk city, Western Siberia.

The field and analytical work on chemistry of natural waters was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Projects FSWW-0022-0014 and FSWW-0022-2020). The analytical work on lithological and mineralogical features of rocks was supported by the Russian Science Foundation (Project 22-17-20029).

REFERENCES

- Verigo E.K., Bykova V.V., Gusev V.K. Zaeltsovskoe mestorozhdenie radonovykh vod (Novosibirskoe Pribye) [Zaeltsovsky deposit of radon waters (Novosibirsk Pribye)]. *New data on geology and minerals of Western Siberia*, 1979, Iss. 14, pp. 47–51.
- Gusev V.K., Verigo E.K. Radonovye vody Kolyvan-Tomskoy skladchatoy zony, ikh ispolzovanie i okhrana [Radon waters of the Kolyvan-Tomsk folded zone, their use and protection]. *Izmeneniye prirodnikh usloviy pod vliyaniem deyatel'nosti cheloveka* [Changes in natural conditions under the influence of human activity]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. pp. 99–107.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the southern West Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1255–1274. In Rus.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V., Kamenova-Totzeva R.M., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the «Kamenskoe» field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 192–208. In Rus.
- Novikov D.A., Kopylova Y.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyrayev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters «Inskie springs» (south-western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 135–145. In Rus.
- Roslyakov N.A., Zhmodik S.M., Pakhomov V.G. Prirodnye radionuklidy v geologicheskoy srede Novosibirskoy oblasti [Natural radionuclides in the geological environment of the Novosibirsk region]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede cheloveka. Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Materials of the IV International Conference]. Tomsk, June 4–8, 2013. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013. pp. 461–464.
- De Caritat P., Danilova S., Jaeger Ø., Reimann C., Storror G. Groundwater composition near the nickel-copper smelting industry on the Kola Peninsula, central Barents Region (NW Russia and NE Norway). *Journal of Hydrology*, 1998, vol. 208, pp. 92–107.
- Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1172, no. 1, no. 012096.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1451, no. 012007.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 15, pp. 1–8.
- Konyshov A.A., Sidkina E.S., Soldatova E.A., Dogadkin D.N., Gromyak I.N. Features of chemical element behavior in the water-rock system of the rubble stone quarry in Pitkäranta district (Karelia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 7–19. In Rus.

12. Malkovskii V.I., Petrov V.A., Dikov Y.P., Aleksandrova E.V., Bychkova Y.V., Mokhov A.V., Shulik L.S. An analysis of the role of colloids in uranium transport in groundwater within the U-Mo deposits of the Strel'tsovskoe ore field (eastern Transbaikalian region). *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 454, no. 1, pp. 29–31. In Rus.
13. Zamana L.V., Chechel L.P. Geokhimiya drenazhnykh vod gornorudnykh ob'ektov volframovogo mestorozhdeniya Bom-Gorkhom (Zabaykalye) [Geochemistry of drainage water of mining objects at the tungsten deposit Bom-Gorkhom (Transbaikalia)]. *Chemistry for Sustainable Development*, 2014, vol. 22, pp. 1–7.
14. Manjón G., Mantero J., Vioque I., Galván J., Díaz-Francés I., García-Tenorio R. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages. *Chemosphere*, 2019, vol. 223, pp. 536–543.
15. Mishra S., Maity S., Pandit G.G. Estimation of distribution coefficient of natural radionuclides in soil around uranium mines and its effect with ionic strength of water. *Radiation Protection Dosimetry*, 2012, vol. 152, no. 1–3, pp. 229–233.
16. Mitra S., Chowdhury S., Mukherjee J., Sutradhar S., Mondal S., Barman C., Deb A. Assessment of radon (^{222}Rn) activity in groundwater and soil-gas in purulia district, west Bengal, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, vol. 330 (3), pp. 1331–1338.
17. Cho B., Kim D., Kim M., Hwang J., Choo C. Hydrogeochemical characteristics of uranium and radon in groundwater from the Goesan area of the Ogcheon metamorphic belt (OMB), Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 2021, vol. 13 (20), DOI: 10.3390/su132011261
18. Hwang, J., Kim S.W. Occurrence of uranopolyrase in pegmatite related to a jurassic granite pluton in cheongwon, South Korea: mineral chemistry and texture of a potential source of uranium and radon in a granite aquifer. *Environmental Earth*, 2021, vol. 80 (14), DOI: 10.1007/s12665-021-09766-5
19. Faweya E.B., Agbetuyi O.A., Talabi A.O., Adewumi T., Faweya O. Radiological implication of ^{222}Rn concentrations in waters from quarries environs, correlation with ^{226}Ra concentrations and rocks geochemistry. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14 (11), DOI: 10.1007/s10967-022-08240-1
20. Adithya V.S.P., Chidambaram S., Prasanna M.V., Venkatramanan S., Tirumalesh K., Thivya C., Thilagavathi R. Health risk implication and spatial distribution of radon in groundwater along the lithological contact in south India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, vol. 80 (1), pp. 308–318.
21. Przylibski T.A., Domin E., Gorecka J., Kowalska A. ^{222}Rn concentration in groundwaters circulating in granitoid massifs of Poland. *Water (Switzerland)*, 2020, vol. 12 (3), DOI: 10.3390/w12030748
22. Knežević J., Kuzmanović P., Mrdja D., Todorović N., Bikit I., Hansman J. Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach. *Journal of Radiological Protection*, 2020, vol. 40 (2), pp. 596–611.
23. Cho B.W., Kim H.K., Kim M.S., Hwang J.H., Yoon U., Cho S.Y., Choo C.O. Radon concentrations in the community groundwater system of South Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191 (3), DOI: 10.1007/s10661-019-7301-y
24. Yu C., Berger T., Drake H., Song Z., Peltola P., Åström M.E. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 663, pp. 16–28.
25. Olise F.S., Akinnagbe D.M., Olasogba O.S. Radionuclides and radon levels in soil and ground water from solid minerals-hosted area, south-western Nigeria. *Cogent Environmental Science*, 2016, vol. 2 (1), DOI: 10.1080/23311843.2016.1142344
26. Rikhvanov L.P. Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v gidrosfere [Radioactivity and radioactive elements in the hydrosphere]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016. pp. 549–557.
27. Rikhvanov L.P. *Radioaktivnye elementy v okruzhayushchey srede i problemy radioekologii* [Radioactive elements in the environment and problems of radioecology]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 430 p.
28. Bakhur A.E. Interpreting technogenic and nontechnogenic radioactive anomalies in environmental objects. *Prospect and protection of mineral resources*, 2018, no. 7, pp. 58–62. In Rus.
29. *Pogoda i klimat* [Weather and climate]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=29638&bday=15&fday=%D0%9F%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%8C&amonth=12&ayear=2020&bot=2> (accessed 15 February 2022).
30. Babin G.A. Chernykh A.I., Golovina A.G., Zhigalov S.V., Dolgushin S.S., Vetrov E.V., Korableva T.V., Bodina N.A., Svetlova N.A., Fedoseev G.S., Khilko A.P., Epifanov V.A., Loskutov Yu.I., Loskutov I.Yu., Mikharevich M.V., Pikhutin E.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-44 – Novosibirsk. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-44 – Novosibirsk. Explanatory letter]. St. Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 2015. 392 p.

Received: 20 April 2022.

Information about the authors

Anna F. Sukhorukova, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.