



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-208>

УДК 622.03

**Состав и минералогия гранитоидов Обь-Зайсанской складчатой области в связи с прогнозом радиоактивности подземных вод**В. П. Сухоруков^{1,3}  , А. Ф. Сухорукова^{2,3}   , Д. А. Новиков^{2,3}  , А. С. Деркачев^{2,3}  ¹ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация³ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru**Аннотация**

Представленное исследование выполнено в продолжение работ, связанных с изучением природы радиоактивности дренажных вод карьеров Новосибирской области, выполненных лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГТ СО РАН, где показано, что воды гранитных карьеров характеризуются существенно более высокими значениями радиоактивности, чем воды других вмещающих пород. Впервые представлены результаты детальных минералогических и геохимических исследований гранитоидов Обь-Зайсанской области в пределах Кольвань-Томской складчатой системы. Актуальность настоящего исследования определяется полученными ранее данными о высоких концентрациях урана, тория и радона в дренажных водах разрабатываемых карьеров этой территории. Изучены гранитоиды приобского (Обской и Новосибирский массивы) и барлакского комплексов. Установлено, что породы комплексов существенно различаются спектром акцессорных минералов, которые выступают концентраторами природных радиоактивных и редкоземельных элементов: в барлакском, помимо апатита, сфена и циркона, характерных для всех фаз внедрения, фиксируются флюорит, топаз, рутил и обогащенные редкоземельными элементами минералы: монацит, ксенотим, бастнезит, паризит, реже уранинит. Показано, что широкий спектр минералов-концентраторов радиоактивных и редкоземельных элементов определяет более высокие концентрации радионуклидов в подземных водах барлакского гранитоидного комплекса. Максимальные концентрации урана на порядок, а тория на два порядка выше в подземных водах барлакского гранитоидного комплекса, по сравнению с приобским. В подземных водах изученных гранитоидных комплексов установлены максимальные концентрации, мг/дм³: ²³⁸U до 1,40 и ²³²Th до 2,16 · 10⁻³. Можно прогнозировать высокий фон радионуклидов в подземных водах барлакского и приобского гранитоидных комплексов в пределах, мг/дм³: ²³⁸U от 0,1 · 10⁻³ до 1,40 и ²³²Th от 1 · 10⁻⁶ до 2,16 · 10⁻³. Активность радона ²²²Rn в подземных водах при этом будет составлять от 1–50 Бк/дм³ в зонах контактов гранитоидов с разновозрастными осадочными породами до 600–5000 Бк/дм³ в областях развития гранитоидов.

Ключевые слова

гранитоиды, минералы-концентраторы радиоактивных и редкоземельных элементов, подземные воды, радионуклиды, ²³⁸U, ²³²Th, ²²²Rn, Новосибирская область, Западная Сибирь

Благодарности

Полевые и аналитические работы по изучению химического состава природных вод выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014, аналитические работы по изучению минералого-петрографических и геохимических особенностей гранитоидов Обь-Зайсанской складчатой области – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Для цитирования

Sukhorukov V. P., Sukhorukova A. F., Novikov D. A., Derkachev A. S. Composition and mineralogy of granitoids of the Ob-Zaisan folded region in the context of the prediction of groundwater radioactivity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):105–115. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-208>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Composition and mineralogy of granitoids of the Ob-Zaisan folded region in the context of the prediction of groundwater radioactivityV. P. Sukhorukov^{1,3}  , A. F. Sukhorukova^{2,3}   , D. A. Novikov^{2,3}  , A. S. Derkachev^{2,3}  ¹ V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation² A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru**Abstract**

The presented research is carried out in continuation of the works connected with studying the nature of radioactivity of drainage waters of quarries of Novosibirsk region, performed by the Laboratory of Hydrogeology of Sedimentary Basins of Siberia, INGG SB RAS, which showed that the waters of granite quarries are characterized by significantly higher radioactivity, than waters of other host rocks. The results of detailed mineralogical and geochemical studies of granitoids of the Ob-Zaisan region within the Kolyvan-Tom folded system are presented for the first time. The relevance of the present study is determined by the previously obtained data on high concentrations of uranium, thorium, and radon in drainage water of quarries developed in this territory. The granitoids of the Priobsky (Obsky and Novosibirsk massifs) and Barlak complexes were studied. It was established that the rocks of the complexes differ significantly in the spectrum of accessory minerals, which acted as the concentrators of natural radioactive and rare-earth elements: in the Barlak, in addition to apatite, sphene, and zircon, typical for all phases of the intrusion, fluorite, topaz, rutile, and minerals enriched with rare-earth elements are found: monazite, xenotime, bastnesite, parisite, less often uraninite. It was shown that a wide range of mineral-concentrators of radioactive and rare-earth elements determines higher concentrations of radionuclides in groundwater of the Barlak granitoid complex. Maximum uranium concentrations are one order of magnitude and those of thorium are two orders of magnitude higher in the groundwater of the Barlak granitoid complex compared to those of the Priobsky granitoid complex. The following peak concentrations, mg/dm³, were established in the groundwater of the studied granitoid complexes: ²³⁸U up to 1.40 and ²³²Th up to 2.16 · 10⁻³. One can predict a high background of radionuclides in the groundwater of the Barlak and Priobsky granitoid complexes, within the ranges, mg/dm³: ²³⁸U from 0.1 · 10⁻³ to 1.40 and ²³²Th from 1 · 10⁻⁶ to 2.16 · 10⁻³. Radon ²²²Rn activity in the groundwater ranges 1–50 Bq/dm³ in the contact zones of granitoids with different-aged sedimentary rocks to 600–5,000 Bq/dm³ in the areas of granitoids occurrence.

Keywordsgranitoids, mineral-concentrators of radioactive and rare-earth elements, groundwater, radionuclides, ²³⁸U, ²³²Th, ²²²Rn, Novosibirsk region, Western Siberia**Acknowledgements**

Field and analytical work on the study of the chemical composition of natural waters was carried out with the financial support of the project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № FWZZ-2022-0014, and the analytical work on the study of mineralogical, petrographic, and geochemical features of the granitoids of the Ob-Zaisan folded region, with the support of the project № 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk region.

For citation

Sukhorukov V. P., Sukhorukova A. F., Novikov D. A., Derkachev A. S. Composition and mineralogy of granitoids of the Ob-Zaisan folded region in the context of the prediction of groundwater radioactivity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):105–115. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-208>

Введение

Одной из наиболее актуальных задач современной гидрогеохимии является изучение явления радиоактивности природных вод и выявление факторов, его контролирующих. Ранее было показано, что воды гранитных карьеров характеризуются существенно более высокими значениями радиоактивности в сравнении с водами других вмещающих пород на примере

дренажных вод карьеров Новосибирской области [1] и естественных выходов подземных вод [2] в пределах Обь-Зайсанской складчатой зоны.

Во многих странах мира – в Китае, Индии, Турции, США, Мексике, Норвегии, Великобритании, Венгрии, Египте, странах Азии и других, активно изучаются и моделируются процессы миграции радионуклидов в подземных водах. Исследования на юго-востоке



Мексика, по данным J.I. Morales-Arredondo и др., показали, что несмотря на то что концентрации изотопов урана и тория в подземных водах достаточно низкие и не представляют опасности для населения, необходимо контролировать концентрацию радона, которая может быть высокой [3]. По мнению китайских ученых С. Yu, Z. Song и многих других, процессы выветривания гранитных массивов усиливают рассеивание и перенос урана и тория в водную среду, они также отмечают важную роль изменения геохимических условий [4]. В работах P. Baják, K. Csondor, D. Pedretti и др. разрабатываются концептуальные модели подвижности радионуклидов в породах и подземных водах, в которых учитывается изменение окислительно-восстановительных условий в водоносных горизонтах для территории Венгрии [5]. S.M. Pérez-Moreno, J.L. Guerrero, F. Mosqueda и др. проводили анализ гидрохимического поведения долгоживущих природных радионуклидов урана, тория и радона в подземных водах Испании с различными геологическими характеристиками и оценку дозы при поступлении этих радионуклидов в организм с водой. Показано, что их высокая концентрация связана с гранитным основанием и восстановительными условиями [6].

Активность радона в водах повсеместно оценивается как возможный экологический риск для населения и определяется радиоактивным распадом элементов уран-радиевого ряда. При этом прямой зависимости между содержанием урана во вмещающих породах и концентрацией радона в подземных водах не обнаруживается [3].

Результаты исследования радиоактивности подземных вод в различных регионах показывают, что максимально высокое содержание таких радионуклидов, как уран и торий, обычно связано с кислыми интрузивными породами, в которых средние концентрации (по Н.А. Григорьеву) урана составляют 3,2 и 14,0 г/т соответственно¹. В водах кислых магматических пород зоны интенсивного водообмена содержание урана составляет от $2,0 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³. Полученные нами ранее данные о концентрации урана в пробах воды позволяют отнести подземные воды гранитоидов Обь-Зайсанской области по классификации А.Н. Токарева к урановым водам и при более высоких концентрациях – даже к водам урановых месторождений.

Для территории г. Новосибирска и его окрестностей начиная с 2018 г. коллективом лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН проводятся работы по изучению химического и радионуклидного состава, активности радона в подземных водах различных водоносных горизонтов [7]. Были изучены воды как в зоне распространения гранитоидов, так и за ее пределами: в глинистых сланцах и мраморизованных известняках верхнедевонско-нижнекаменноугольного возраста. Детально

изучались радоновые воды на месторождениях Тулинское [8], Каменское [9], на карьере Борок [10]. Получены данные о содержании урана и тория в подземных водах. Одновременно проводился отбор проб горных пород водовмещающих горизонтов с целью их детального минералого-петрографического изучения.

В этой связи основной целью настоящего исследования является выявление связей между составом, минералогией и спектром акцессорных минералов приобского и барлакского комплексов гранитоидов Обь-Зайсанской складчатой зоны и уровнем радиоактивности подземных вод, развитых в их пределах.

Методы и объект исследования

В основу настоящего исследования положена коллекция геологических образцов пород и проб воды, отобранных авторами статьи в ходе экспедиционных работ в 2022–2023 гг. в пределах Обь-Зайсанской складчатой зоны, из областей распространения гранитоидов приобского и барлакского комплекса. Горные породы отбирались на 10 участках из карьеров Борок, Скала, Новобибеевский, Горский, Тулинский, Мочище, обнажений, приуроченных к выходам подземных вод, керна скважин (рис. 1).

Микроскопическое описание петрографических 29 шлифов гранитоидов проведено классическим методом. Определение содержаний петрогенных элементов выполнено методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием установки СРМ-25 в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН, г. Новосибирск). Определение уровней концентрации редких и редкоземельных элементов в гранитах проводилось методом ICP-MS с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan (Германия) в ЦКП МИИ СО РАН (г. Новосибирск) по стандартной методике.

Акцессорный минеральный парагенезис в породах Новосибирского гранитоидного массива изучен в полированных пластинках методом сканирующей электронной микроскопии на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (TESCAN ORSAY Holding).

Коллекция подземных вод составила 78 проб, непосредственно на объектах было выполнено определение рН, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью оборудования (Наппа Н19125, 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 Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета (ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ).

¹ Геологический словарь: в 3 т. Гл. ред. О.В. Петров; Ред.-сост.: С.И. Андреев и др. Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ; 2010–2012.

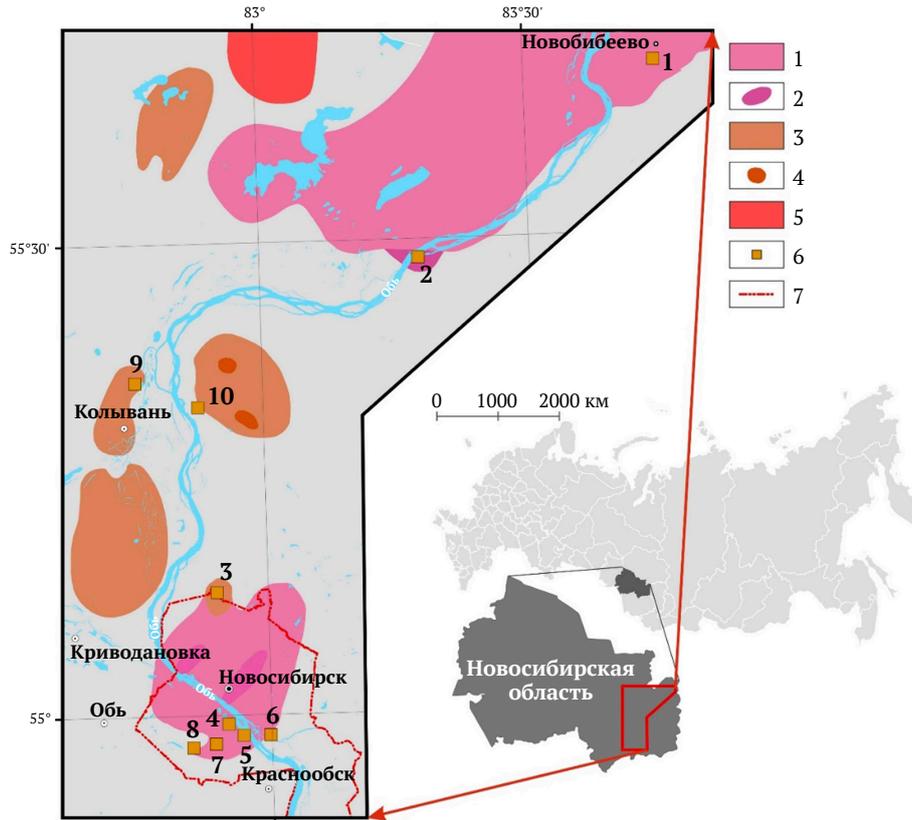


Рис. 1. Местоположение района исследования и участки отбора пород:

- 1 – приобский комплекс, 2-я фаза внедрения; 2 – приобский комплекс, 1-я фаза внедрения; 3 – барлакский комплекс, 1-я фаза внедрения; 4 – барлакский комплекс, 2-я фаза внедрения; 5 – позднепермско-среднетриасовые граниты; 6 – участки исследования (название в табл. 1); 7 – граница г. Новосибирска

Геологическое строение

В пределах Обь-Зайсанской складчатой области широко распространены карбонатно-вулканогенно-терригенные отложения среднедевонско-раннекаменноугольного возраста, перекрытые четвертичными аллювиальными и субаэральными отложениями. В пермско-триасовое время произошло внедрение в них гранитной интрузии и были образованы гранитоиды Новосибирского массива, выделяются приобский и барлакский комплексы.

Приобский комплекс представлен петротипическими Обским и Новосибирским массивами в Новосибирской складчатой зоне (Колывань-Томская складчатая система) и характеризуется трехфазным строением. Первая фаза сложена монцонитами и кварцевыми монцонитами ($\mu P_3-T_1 p_1$), реже встречаются диориты. Вторая главная фаза представлена монцогранитами ($\epsilon \gamma P_3-T_1 p_2$), меньше распространены граносиениты, граниты и гранодиориты. Третья фаза включает малые штоки и дайки монцогранитов ($\epsilon \gamma P_3-T_1 p_3$), монцолейкогранитов и их порфировых аналогов [11].

В составе барлакского комплекса выделены две фазы внедрения. Первая, главная, фаза сложена среднезернистыми монцолейкогранитами ($\epsilon \gamma T_{1-2} b_1$), реже отмечаются лейкограниты и монцограниты ($\epsilon \gamma T_{1-2} b_1$). Вторая фаза представлена небольшими те-

лами и дайками мелкозернистых монцолейкогранитов ($\epsilon \gamma T_{1-2} b_2$).

На изученной территории гранитоиды представлены второй фазой приобского (P_3-T_1) и первой фазой барлакского комплекса (T_{1-2}).

Многофазный **приобский комплекс** имеет сравнительно простой породный состав. Диориты, кварцевые диориты, их умеренно-щелочные аналоги составляют первую фазу и имеют ограниченное развитие. Вторая фаза приобского комплекса составляет крупный Новосибирский массив, расположенный в черте города, вскрывается на участках Горский, Тулинский, Бугринский, Тролельный, в карьере Борок, а также Обской массив на участках Дубровинский и Новобибеевский (рис. 2, а–е). Опробованные породы второй фазы представлены биотитовыми и биотит-амфиболовыми гранитами, монцогранитами, реже лейкогранитами. Биотит-амфиболовые граниты содержат около 25 % кварца, по 20–35 % калишпата и плагиоклаза, содержание биотита и роговой обманки незначительное, около 2–5 об.%. В качестве акцессорных минералов присутствуют сфен, апатит и циркон. Структура пород преимущественно равномернозернистая, гипидиоморфная, с размером зерен 2–3 мм, реже порфировидная с размером вкрапленников до 15 мм. На участке Новобибеевский породы имеют признаки деформаций.

По петрохимическому составу породы лежат в области умеренно-щелочных гранитов. Содержание кремнезема варьирует от 66 до 71 масс.%, реже до 75 % в лейкогранитах. Содержание $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ лежит в интервале 8,1–9,5 масс.% (рис. 3, а).

Барлакский комплекс характеризуется монотонным составом. Он представлен биотитовыми монцогранитами, реже лейкогранитами порфиroidными, в окраске которых внутри катаклазированных зон

при выветривании появляются желтовато-красноватые оттенки. Точечная сульфидная вкрапленность и касситерит встречаются в кварцевых жилах, а берилл и топаз – в пегматитах. Ультракислые граниты относятся к умеренно-щелочным калиевым (породы этого комплекса опробованы в карьере Мочище, где массив гранитоидов барлакского комплекса прорывают граниты второй фазы приобского комплекса, и на участках Скала и Бибиха (рис. 2, з, ж).

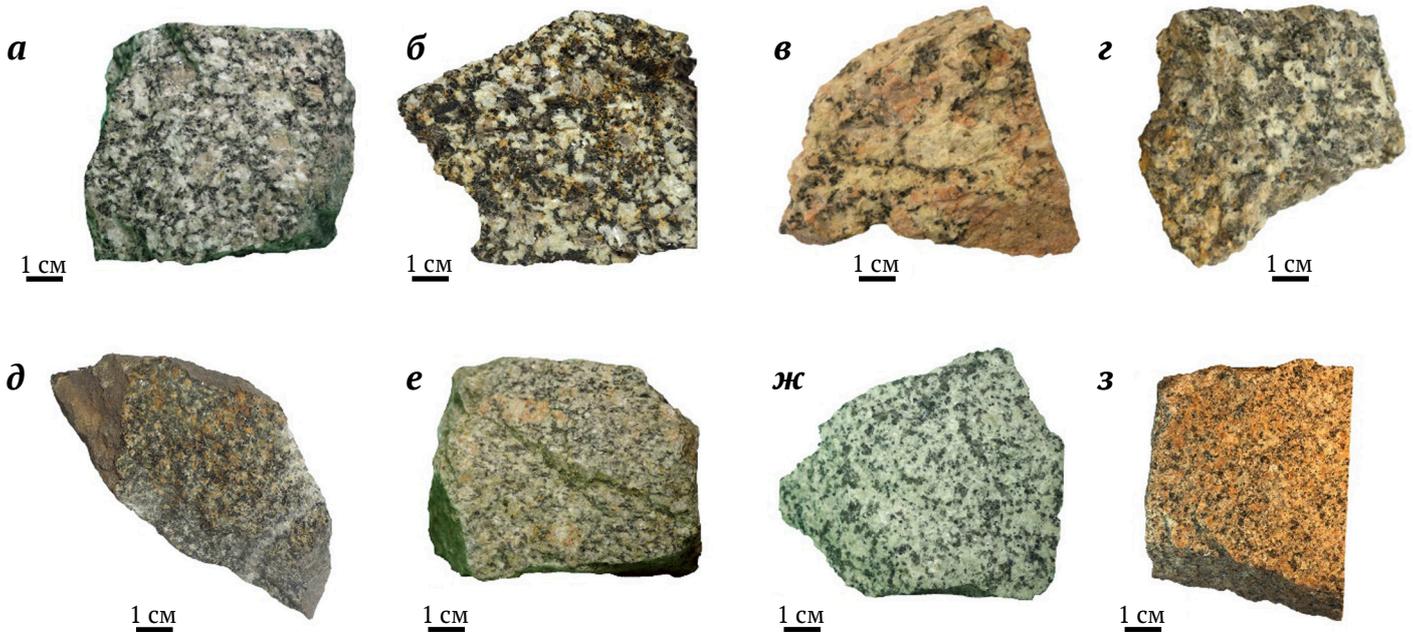


Рис. 2. Основные типы пород гранитоидов Обь-Зайсанской области:

приобского комплекса: а – гранит биотит-амфиболовый (участок Борок); б – гранит биотит-амфиболовый (участок Бугринский); в – монцогранит (участок Горский); г – гранит биотит-амфиболовый (участок Тулинский); д – гранодиорит пироксен-амфибол-биотитовый (участок Дубровинский); е – гранит биотитовый порфиroidный (участок Новобибеевский); барлакского комплекса: ж – биотитовый монцогранит (участок Скалинский); з – лейкогранит порфиroidный (участок Мочищенский)

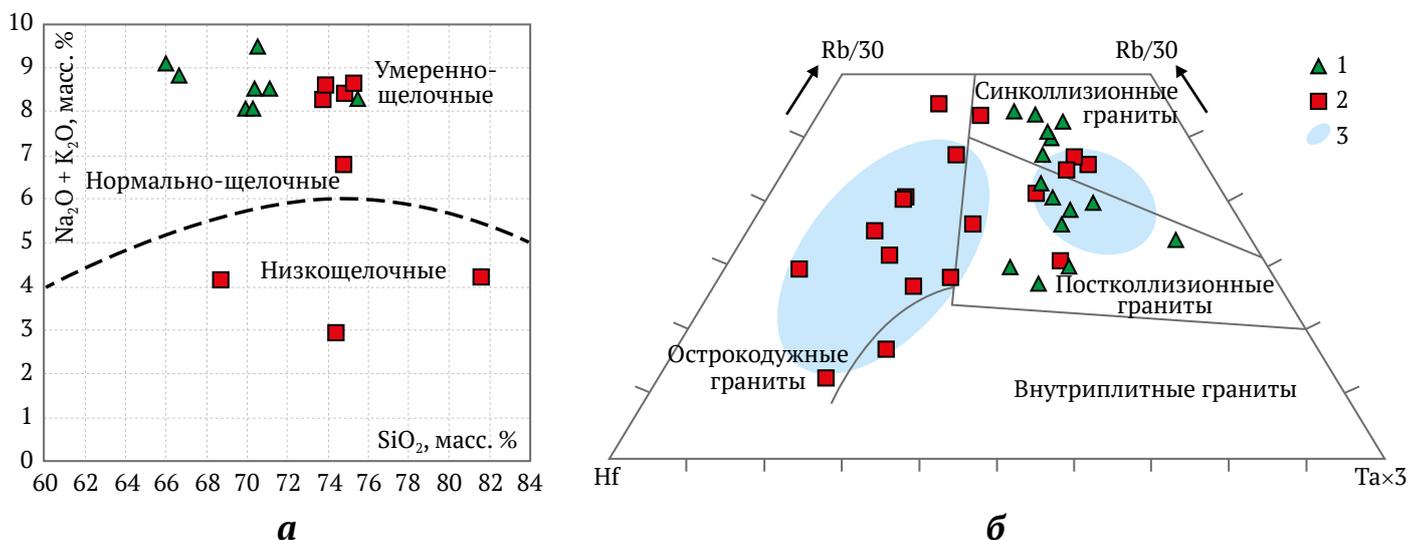


Рис. 3. Состав гранитоидов приобского и барлакского комплексов на диаграммах:

а – диаграммы $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$; б – дискриминационные диаграммы: 1 – приобский; 2 – барлакский комплексы; 3 – поля распространения комплексов гранитоидов (согласно А. Г. Бабину и др. [11])



Породы представлены биотитовыми монцогранитами, реже лейкогранитами. Содержание кварца 30–35%, примерно равное содержание калишпата и плагиоклаза – 30–40% и биотита от 2 до 10%. Структура пород гранитная, гипидиоморфная, размер зерен может варьировать от мелкозернистых (0,5–1 мм) до среднезернистых (2–4 мм). В качестве аксессуарных фаз в гранитах отмечаются циркон и апатит, в некоторых образцах ортит и монацит.

По петрохимическому составу породы относятся к умеренно-щелочному ряду, что согласуется с высоким содержанием в них калишпата, реже к нормально- и низкощелочным. Содержание суммы $K_2O + Na_2O$ находится преимущественно в интервале 6,5–8,6 масс.%, в редких случаях снижается до 3–4,3. Содержание SiO_2 (69–82 масс.%) в гранитах барлакского комплекса отличает их от гранитов приобского комплекса, в которых оно составляет преимущественно 66–71 масс.% (см. рис. 3, а).

На дискриминационных диаграммах (рис. 3, б) гранитоиды приобского комплекса по полученным результатам ИСП исследований отобранных образцов пород располагаются в поле синколлизионных и постколлизионных гранитов, а гранитоиды барлакского комплекса – в поле островодужных, что соответствует данным А.Г. Бабина и др. [11].

Минералого-петрографическая характеристика пород

Наиболее широко опробованы породы приобского комплекса, отобрана коллекция из 15 образцов на 7 участках, определено шесть типов пород. Барлакский комплекс изучен на трех участках в 14 образцах пород, выделены два типа пород. В табл. 1 представлены основные типы пород, которые были отобраны для минералого-петрографического изучения, общий вид представлен в фототаблице на рис. 2, описание приводится ниже.

Породы приобского комплекса

Биотит-амфиболовый гранит (рис. 4, а). Опробован в Новосибирском массиве (участки Тулинский, Троллейный, Бугринский, Горский) и Обском массиве (участок Дубровинский).

Минеральный состав: породообразующие минералы, %: кварц 25–30, плагиоклаз 30–45, микроклин 23–35, амфибол 2–5, биотит 3–7; аксессуарные минералы: сфен, апатит, циркон (см. рис. 2, а). Породы образованы идиоморфными кристаллами плагиоклаза и темноцветов и расположенными между ними ксеноморфными зернами калишпата и кварца. Плагиоклаз образует призматические и удлиненные идиоморфные кристаллы, часто с выраженной огранкой, полисинтетическими двойниками и зональным строением. Размер зерен преимущественно 1,5–2 мм. Микроклин образует ксеноморфные зерна размером 2–4 мм, расположенные между идиоморфными лейстами плагиоклаза. Характеризуется пертитовыми структурами. Кварц образует ксеноморфные зерна 1–2 мм, форма зерен изометричная или слабоудлиненная, с неровными границами, часто с блочным

погасанием. Роговая обманка образует идиоморфные кристаллы 1–1,5 мм, удлиненные до призматических, местами с выраженной огранкой. Окраска от темно-зеленой до черной. Биотит таблитчатого габитуса 1–2 мм, окраска темно-коричневая, частично замещается хлоритом. Сфен образует хорошо ограненные ромбовидные кристаллы размером около 0,5 мм или более крупные зерна до 1 мм без выраженной огранки. Апатит образует длиннопризматические бесцветные кристаллы размером до 0,2–0,5 мм.

Монцогранит порфиоровидный (участок Борок, рис. 4, б). Минеральный состав, %: кварц около 30, плагиоклаз 15–20, микроклин 45–50, биотит 3–5. Аксессуарные минералы: циркон, апатит, сфен. Структура породы порфиоровидная, структура основной массы гипидиоморфная. Вкрапленники образованы кристаллами калишпата и плагиоклаза, размер от 4 до 8–10 мм. Размер зерен в основной массе около 1–2 мм. Плагиоклаз образует удлиненные кристаллы, некоторые из которых имеют хорошую огранку, другие – искривленные, зазубренные грани. Микроклин образует изометричные зерна с неровными краями. У вкрапленников отмечаются зоны дорастания, отличающиеся обильными включениями кварца. Микроклин, как правило, пертитовый. Биотит коричневый, образует отдельные зерна и линзовидные скопления. Аксессуарные минералы встречаются в виде единичных зерен. Циркон – изометричные зерна около 0,1 мм, сфен – идиоморфные ромбовидные зерна в сростании с рудным минералом. Вторичные изменения – незначительная серицитизация плагиоклаза и пелитизация микроклина.

Таблица 1

Основные типы пород гранитоидов
Обь-Зайсанской области

№	Участок	Тип породы
Приобский комплекс		
<i>Новосибирский массив</i>		
1	Борок	Гранит биотит-амфиболовый Монцогранит
2	Бугринский	Гранит биотит-амфиболовый
3	Горский	Монцогранит Лейкогранит
4	Тулинский	Гранит биотит-амфиболовый
5	Троллейный	Гранит биотит-амфиболовый
<i>Обской массив</i>		
6	Дубровинский	Гранодиорит пироксен-амфибол-биотитовый Гранит биотитовый Диорит меланократовый Лейкогранит
7	Новобибеевский	Гранит биотитовый порфиоровидный
Барлакский комплекс		
8	Скалинский	Биотитовый монцогранит
9	Бибихинский	Биотитовый монцогранит
10	Мочищенский	Лейкогранит порфиоровидный

Лейкограниты – участки Горский, Дубровинский (рис. 4, в). Минеральный состав, %: кварц 30–35, плагиоклаз 35–50, ортоклаз 15–30, биотит не более 2. Акцессорные минералы встречаются редко, представлены в основном сфеном и апатитом. На участке Дубровино в качестве акцессорного минерала лейкогранитов встречается гранат. Структура равномерная, гранитная. Размер зерен от 0,5 до 1–2 мм. Плагиоклаз образует более идиоморфные зерна с неровными краями, ортоклаз и кварц – изометричные, ксеноморфные зерна. Биотит темно-коричневый, широко-таблитчатый, частично замещается хлоритом. Сфен образует ромбовидные кристаллы до 0,5 мм в длину. Гранат образует изометричные кристаллы, бесцветные, размером до 0,2–0,3 мм, равномерно распределенные в породе, слагает до 1 об.% породы. Кристаллы граната часто с выраженной огранкой и ритмично-зональным строением.

Гранодиорит пироксен-амфибол-биотитовый – участок Дубровинский (рис. 4, з). Породы сходны по составу и структуре с биотит-амфиболовыми гранитами, но отличаются более низким содержанием кварца и присутствием незначительного количества

клинопироксена. Минеральный состав, %: кварц 20, плагиоклаз 30, микроклин 30, биотит 10, пироксен 3, амфибол 7. Акцессорные минералы представлены значительным количеством апатита (до 1 об.% породы), а также сфеном и цирконом. Структура породы гипидиоморфная, размер зерен порядка 1–2 мм. Плагиоклаз образует частично ограненные зерна с полисинтетическими двойниками, микроклин и кварц – изометричные ксеноморфные зерна без огранки. Темноцветы образуют скопления и пятна. Клинопироксен бесцветный, часто замещается каймой светло-зеленого амфибола. Биотит коричневый, до светло-коричневого. Апатит образует призматические кристаллы до 0,3–0,5 мм с обильными включениями игольчатого рудного минерала. Сфен образует зерна изометричные, без огранки, размером до 0,1 мм, циркон – ограненные зерна до 0,1 мм.

Диорит меланократовый – участок Дубровинский (рис. 4, д). Минеральный состав, %: плагиоклаз 30, роговая обманка 40, клинопироксен 20, биотит 10, акцессорные минералы: апатит и циркон. Структура породы гипидиоморфная, неравномернотекстурированная. Порода состоит преимущественно из плагиоклаза

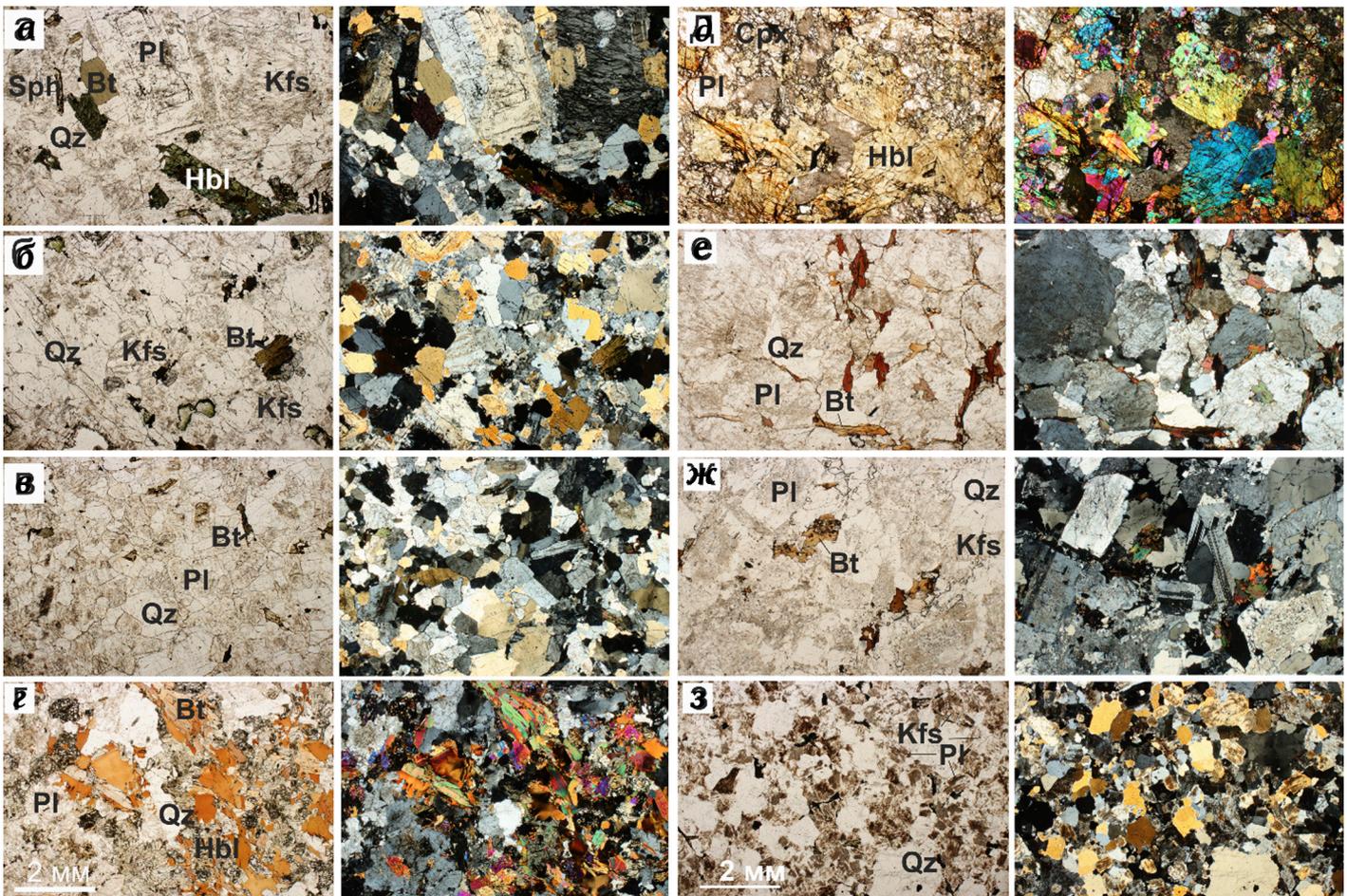


Рис. 4. Микрофотографии шлифов гранитоидов из опробованных массивов (см. табл. 1):

приобский комплекс: а – биотит-амфиболовый гранит; б – монцогранит; в – лейкогранит;

дубровинский комплекс: д – диорит меланократовый; е – гранит биотитовый;

барлакский комплекс: ж – биотитовый монцогранит; з – лейкогранит.

Слева даны фотографии при одном, справа – при скрещенных николях. Все фотографии сделаны в одном масштабе. Обозначения минералов: Bt – биотит; Hbl – роговая обманка; Kfs – калишпат; Pl – плагиоклаз; Qz – кварц, Sph – сфен



и амфибола (размер зерен порядка 2–3 мм), клинопироксена (0,3–0,5 мм) и биотита (0,3 мм). Плаггиоклаз образует ксеноморфные зерна, расположенные между зернами амфибола, частично серицитизирован. Роговая обманка светло-зеленого цвета образует идиоморфные зерна, часто с огранкой. Клинопироксен образует более мелкие зерна изометричного габитуса, расположенные в виде включений в плаггиоклазе, иногда скопления таких зерен окружают амфибол. Биотит светло-коричневого цвета образует вставки в зернах амфибола. Апатит встречается часто, образует удлиненные кристаллы размером до 1 мм с обильными включениями рудного минерала. Циркон образует ограненные кристаллы до 0,15 мм.

Гранит биотитовый – участки Дубровинский, Новобибеевский (см. рис. 2, е). Минеральный состав, %: кварц 20, биотит 10, микроклин 15, плаггиоклаз 55, акцессорные минералы: апатит и циркон (рис. 4, е). Структура породы гипидиоморфная, катакластическая. На участке Новобибеево распространены порфиroidные разновидности. Плаггиоклаз в породе образует изометричные и слабоудлиненные зерна размером 2–3 мм, частично с огранкой, микроклин и кварц – ксеноморфные зерна без огранки. Биотит образует красновато-коричневые удлиненные чешуи 0,5–1 мм, которые часто расположены по границам зерен кварца и полевых шпатов, местами деформированы. В порфиroidных разновидностях вкрапленники сложены ортоклазом, их размер составляет около 10 мм. Апатит образует слабоудлиненные кристаллы до 0,3 мм, центральная часть которых сероватая за счет пылевидной примеси. Циркон – изометричные зерна до 0,1 мм.

Породы барлакского комплекса

Барлакский и Кольванский массивы сложены сходными по составу породами. Они опробованы в районе сел Биби́ха и Скала соответственно. Породы представлены в основном равномернозернистыми среднезернистыми биотитовыми монцогранитами. Породы биотитовые; роговая обманка в подчиненном количестве отмечена в лейкогранитах Мочищенского штока и в редких случаях в монцолейкогранитах Барлакского массива. Во всех породах калинатовый полевой шпат преобладает над плаггиоклазом.

Биотитовые монцограниты – участки Скалинский, Биби́хинский (рис. 4, ж). Минеральный состав пород, %: кварц 35, микроклин 30, плаггиоклаз 25, биотит 10. Структура пород гранитная. Плаггиоклаз образует идиоморфные кристаллы призматического габитуса размером 0,5–2 мм, микроклин образует призматические кристаллы с неровными краями и пойкилитовыми вставками плаггиоклаза. Кварц образует ксеноморфные изометричные зерна. Биотит темно-коричневый до черного, широкопластинчатые чешуи, часто ассоциирует с акцессорными минералами.

Порфиroidные лейкограниты – участок Мочищенский (рис. 4, з). Мочищенский шток, расположенный на краю Новосибирского массива, был опробован в карьере Мочи́ще. Породы представлены порфиroidными лейкогранитами. Минеральный состав, %: кварц 30, ортоклаз 30, плаггиоклаз 38, биотит 2. Акцессорные

минералы: циркон, ортит, апатит. Структура породы порфиroidная, гранитная. Вкрапленники представлены ортоклазом, размер 3–4 мм. Он образует изометричные зерна с неровными краями, часто зональные. В основной массе размер зерен 0,5–1 мм. Плаггиоклаз идиоморфный, образует призматические ограненные зерна, кварц и ортоклаз – ксеноморфные. Биотит образует таблитчатые и удлиненные чешуи от темно-коричневого до черного цвета, частично или полностью замещен вторичным хлоритом. Ортит (рис. 4, ж) образует резко зональные призматические зерна 0,8 мм в длину. Центральная часть зерна светло-коричневая, краевые – практически бесцветные. Циркон зональный, ограненные кристаллы, около 0,15 мм.

Акцессорные минералы

Парагенезис акцессорных минералов в изученных породах представлен широким спектром минералов, большинство из которых могут служить минералами-концентраторами урана, тория и редкоземельных элементов, что определяет радиоактивность самих пород и трещинно-жильных подземных вод.

Породы барлакского комплекса характеризуются более широким спектром акцессорных минералов по сравнению с породами приобского комплекса. Для пород приобского комплекса основные встреченные акцессорные минералы – это апатит, сфен, циркон, они определены на участках Борок, Бугринский, Горский, Тулинский, Дубровинский, Новобибеевский, их описание представлено при характеристике пород.

В барлакском комплексе для Кольванского массива (Скалинский, Биби́хинский участки) в качестве акцессорных минералов также определены широко распространенные во всех гранитоидах Обь-Зайсанской области апатит, сфен и циркон. Кроме того, характерными минералами являются флюорит, топаз и обогащенные редкоземельными элементами минералы, такие как монацит и ксенотим, реже встречается уранинит. Также отмечается наложенная грейзеновая минерализация с касситеритом, который ассоциирует с прожилками серицита.

Флюорит образует главным образом ксеноморфные зерна, обычно бесцветные или с пятнистой фиолетовой окраской. Топаз встречается собственно в монцогранитах, но преимущественно тяготеет к кварцевым прожилкам и пегматоидным обособлениям, в которых образует ограненные призматические кристаллы до 1 см. Монацит и ксенотим образуют зерна без четкой огранки, зональность не видна, часто ассоциируют с темно-коричневым биотитом. Рутил встречается редко, также в ассоциации с биотитом, образует мелкие (0,03 мм) овальные зерна темно-коричневого цвета. Уранинит встречается редко, обнаружен в сростании с монацитом в виде изометричных зерен в биотитовом монцограните карьера Скала.

Для Мочищенского участка Барлакский массив в качестве акцессорных минералов установлены флюорит, кальцит, рутил, циркон, ортит и богатые REE минералы: преимущественно фторкарбонаты бастнезит ((Ce, La, Y) CO₃F) и паризит (CaLa₂(CO₃)₃F₂), реже встречаются монацит (CePO₄) и ксенотим (YPO₄).



Бастнезит образует зерна неправильной формы, в основном без огранки, размером 30–50 мкм, паризит встречается в виде расщепленных кристаллов или скоплений игольчатых кристаллов размером 20–30 мкм, иногда образует сростания с бастнезитом. Монацит и ксенотим образуют в основном изометричные зерна размером 20–30 мкм, иногда также образуют сростания с паризитом, что согласуется с данными В. И. Сотникова и др. [12].

Геохимические особенности трещинно-жильных вод гранитоидов

Трещинно-жильные воды верхнепалеозойских гранитов – преимущественно нейтральные и слабощелочные со значениями pH 6,9–7,8; собственно пресные с величиной общей минерализации от 330 до 690 мг/дм³, характеризуются преимущественно HCO₃ Mg–Ca и SO₄–HCO₃ Na–Mg–Ca составом, с высоким содержанием кремния – от 10 до 23 мг/дм³, при среднем значении 15 мг/дм³. Геохимические параметры среды варьируют от восстановительной до окислительной обстановки с величинами Eh от –81,2 до +509,6 мВ; O₂раств. от 1,62 до 9,91 мг/дм³. Средние значения геохимических коэффициентов для данной группы составляют: Ca/Si – 11,49; Mg/Si – 2,48; Na/Si – 1,25; Si/Na – 0,87; Ca/Na – 10,02; Ca/Mg – 4,76; rNa/rCl – 8,79 и SO₄/Cl – 4,35, что свидетельствует о накоплении в водах кальция, магния и протекании процессов окисления сульфидов.

В микрокомпонентном составе отмечены высокие для вод концентрации Fe, Mn, Zn, которые составляют в среднем, мг/дм³, 1,18; 0,16; 0,02 соответственно. При этом следует отметить, что спектр распределения микрокомпонентов в водах в целом имеет унаследованный характер при сравнении с вмещающими гранитами [7].

Радионуклидный состав подземных вод

В табл. 2 показано содержание урана, тория и радона в водах приобского и барлакского комплексов. Максимально высокие концентрации урана и тория получены для вод в пределах отложений барлакского комплекса (участки Скалинский, Аэрофлот, Мочище), природные радионуклиды содержатся в водах в следующих пределах, мг/дм³: ²³⁸U от 2,0·10⁻² до 1,4 и ²³²Th от 1 до 216,3·10⁻⁵. Отношение ²³²Th/²³⁸U в водах варьирует в интервале от 0 до 1,78·10⁻³. Активность ²²²Rn варьирует в диапазоне от 154 до 630 Бк/дм³, что позволяет отнести их к классам слаборадоновых и умеренно радоновых. Воды приобского комплекса характеризуются существенно более низким содержанием радионуклидов, мг/дм³: ²³⁸U от 0,7·10⁻² до 21,3·10⁻² и ²³²Th от 0,1 до 9,6·10⁻⁵. Отношение ²³²Th/²³⁸U в водах варьирует в интервале от 0 до 36,5·10⁻⁴. Активность ²²²Rn в этих водах варьирует в диапазоне от 6 до 597 Бк/дм³, что позволяет отнести их к классам от безрадоновых до умеренно радоновых (по классификации Н. И. Толстихина).

Таблица 2

Радионуклидный состав подземных вод гранитоидов Обь-Зайсанской области

Место отбора проб воды	U · 10 ⁻²	Th · 10 ⁻⁵	Th/U · 10 ⁻⁴	Rn
	мг/дм ³			Бк/дм ³
Приобский комплекс				
Борок карьер	0,9–21,3* 8,3 (9)	0,1–9,6 4,2 (9)	0,97–14,9 3,1 (9)	18–89 53 (9)
Тулинский карьер	1,2 (2)	0,3–0,7 (2)	2,4–5,7 (2)	2 (1)
Горский карьер	1,0–1,2 (2)	0,1–0,15(2)	9,3–10,4 (2)	0 (2)
Мост-4 (скважина)	0,7–1,8 1,4 (4)	0,1–1,7 0,6 (4)	0,1–2,5 0,7 (4)	285–597 561 (7)
Больница-34 (скважина)	1,5–1,7 1,6 (11)	0,05–1,1 0,1 (11)	1,6–9,2 4,1 (11)	98–276 183 (11)
Новобибеевский карьер	1,0–1,2 1,1 (5)	0,3–3,1 2,0 (5)	2,4–26,6 15,6 (11)	6–39 21 (5)
с. Новобибеево (скважина)	11,4	4,2	36,5	429
Чкаловские просторы ДНГ, скважины	1,1–4,4 3,1 (6)	0,3–1,0 0,5 (6)	0,3–0,9 0,7 (6)	45–141 98 (6)
Барлакский комплекс				
Скала карьер	94–140 118 (4)	3,9–216,3 72,2 (4)	3,3–17,8 5,9 (4)	154–474 334 (4)
Аэрофлот СНТ (скважина)	30,9–34,8 32,3 (11)	0,1–1,4 0,1 (11)	0,1–0,4 0,1(11)	196–352 272 (13)
Мочище карьер**	8–29	н/д	н/д	103–630
Южно-Кольванское проявление**	110–250	н/д	н/д	4150–4960

Примечание: *в знаменателе минимальные и максимальные, в числителе средние значения, в скобках количество определений, ** – фоновые данные, н/д – нет данных



По данным, полученным коллективом лаборатории Гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири в 2018–2023 гг. [1, 2, 11], в трещинных подземных водах глинистых и известково-глинистых сланцев содержание урана и тория закономерно ниже (в отдельных случаях на несколько порядков), чем в гранитоидах.

Так, для проявления вод Инские источники в глинистых сланцах природные радионуклиды содержатся в следующих пределах, мг/дм³: ²³⁸U от $2,83 \cdot 10^{-3}$ до $4,13 \cdot 10^{-3}$; ²³²Th от $2,39 \cdot 10^{-6}$ до $1,16 \cdot 10^{-5}$, отношение ²³²Th/²³⁸U в водах варьирует в интервале от $8,85 \cdot 10^{-4}$ до $3,61 \cdot 10^{-3}$, активность ²²²Rn при этом изменяется в диапазоне от 7 до 149 Бк/дм³. Подземные воды в районе с. Верх-Тула (источник, скважины) характеризуются еще более низкими содержаниями радионуклидов в пределах, мг/дм³: ²³⁸U от $3,8 \cdot 10^{-6}$ до $7,2 \cdot 10^{-5}$; ²³²Th от 0,1 до $8,0 \cdot 10^{-5}$, активность радона до 28 Бк/дм³. Такие содержания являются характерными для водоносного комплекса широко распространенных девонских глинистых сланцев.

Заключение

Проведено детальное изучение состава и минералогии гранитоидов Обь-Зайсанской складчатой зоны, впервые выделен широкий спектр аксессуарных минералов, различный для приобского и барлакского комплексов. Для барлакского, кроме апатита, сфена,

циркона, которые определяются в обоих комплексах, выделены флюорит, топаз, монацит, ксенотим, касситерит, рутил, ортит, реже встречается уранинит и богатые редкоземельными элементами бастнезит и паризит. Воды барлакского массива (участки: Скала, Мочище, Аэрофлот) характеризуются максимально высокими значениями содержания урана и тория.

Необходимо отметить, что в целом полученные данные хорошо коррелируются с концентрациями радионуклидов в подземных водах территории исследования. Концентрации урана и тория в гранитоидах на несколько порядков выше, чем в других водовмещающих породах Обь-Зайсанской складчатой области широко распространенных по площади глинистых и карбонатных сланцев, а также интрузивов среднего состава, известняках, углях. Полученные данные в дальнейшем будут использованы для моделирования процессов взаимодействия в системе вода–порода.

Можно прогнозировать высокий фон радионуклидов в подземных водах ореолов распространения барлакского и приобского гранитоидных комплексов в пределах, мг/дм³: ²³⁸U от $0,1 \cdot 10^{-3}$ до 1,40 и ²³²Th от $1,0 \cdot 10^{-6}$ до $2,16 \cdot 10^{-5}$. Активность радона ²²²Rn в подземных водах при этом будет составлять от 1–50 Бк/дм³ в зонах контактов гранитоидов с разновозрастными осадочными породами до 600–5000 Бк/дм³ в областях развития гранитоидов.

Список литературы / References

1. Деркачев А.С., Максимова А.А., Новиков Д.А. и др. Природа радиоактивности дренажных вод карьеров Новосибирской области. *Горные науки и технологии*. 2022;7(3):216–230. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-216-230>
2. Derkachev A.S., Maksimova A.A., Novikov D.A. et al. Nature of radioactivity of quarry drainage waters in the Novosibirsk region. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(3):216–230. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-216-230>
3. Novikov D.A., Kopylova Yu. G., Sukhorukova A.F. The Inskie Springs: new insights into low-radon waters. *Russian Geology and Geophysics*. 2022;63(12):1424–1441. <https://doi.org/10.2113/RGG20214337>
4. Morales-Arredondo J.I., Hernández M.A.A., Hernández-Mendiola E. et al. Hydrogeochemical behavior of uranium and thorium in rock and groundwater samples from southeastern of El Bajío Guanajuatense, Guanajuato, Mexico. *Environ Earth Science*. 2018;77:567. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7749-z>
5. Yu C., Berger T., Drake H. et al. 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;663:16–28.
6. Baják P., Csondor K., Pedretti D. et al. Refining the conceptual model for radionuclide mobility in groundwater in the vicinity of a Hungarian granitic complex using geochemical modeling. *Applied Geochemistry*. 2022;137:105201. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105201>
7. Pérez-Moreno S.M., Guerrero J.L., Mosqueda F. et al. Hydrochemical behaviour of long-lived natural radionuclides in Spanish groundwaters. *Catena*. 2020;191:104558. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104558>
8. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F. et al. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*. 2021;15:100674. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100674>
9. Novikov D.A., Kopylova Yu. G., Pyryaev A.N. et al. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*. 2023;20:100886. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100886>
10. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. и др. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(4):192–208. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3162>
11. Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V. et al. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the «Kamenskoe» field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(4):192–208. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3162>



10. Сухорукова А.Ф. Гидрогеологические условия разработки и гидрогеохимия дренажных вод гранитного карьера Борок. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2022;333(5):209–218. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3507>
Sukhorukova A.F. Hydrogeological conditions of development and hydrogeochemistry of drainage water of the borok granite quarry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2022;333(5):209–218. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3507>
11. Бабин Г.А., Черных А.И., Головина А.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-44. Новосибирск. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ; 2015. 392 с. + 4 вкл.
Babin G.A., Chernykh A.I., Golovina A.G. et al. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Altai-Sayan Series. Sheet N-44.* Novosibirsk: Explanatory Note. St. Petersburg: VSEGEI cartographic plant; 2015, 392 p. + 4 incl. (In Russ.)
12. Сотников В.И., Федосеев Г.С., Кунгурцев Л.В. и др. [Науч. ред. д.г.-м.н. О.П. Иванов]. *Геодинамика, магматизм и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ; 1999. 227 с.
Sotnikov V.I., Fedoseev G.S., Kungurtsev L.V. et al. [Scientific. Ed. Dr.Sci. (Geol. and Mineral.) O.P. Ivanov] *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Kolyvan-Tom fold zone.* Novosibirsk: Publ. House SB RAS, SPC of the IIGGM; 1999. 227 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Василий Петрович Сухоруков – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; доцент, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-6658-2360, Scopus ID 56268382200; e-mail svp@igm.nsc.ru

Анна Федоровна Сухорукова – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; доцент, старший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-4228-7946, Scopus ID 56524401600; e-mail SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Анатольевич Новиков – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; доцент, ведущий научный сотрудник, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-9016-3281, Scopus ID 35318389700; e-mail NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Антон Сергеевич Деркачев – младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; инженер, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6101-6573, Scopus ID 57223290521; e-mail Derkachyovas@ipgg.sbras.ru

Information about the authors

Vasiliy P. Sukhorukov – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Head of Laboratory, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Associate Professor, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation ORCID 0000-0002-6658-2360, Scopus ID 56268382200; e-mail svp@igm.nsc.ru

Anna F. Sukhorukova – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Associate Professor, Senior Researcher, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID 0000-0003-4228-7946, Scopus ID 56524401600; e-mail SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

Dmitry A. Novikov – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Head of Laboratory, A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Associate Professor, Leading Researcher, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID 0000-0001-9016-3281, Scopus ID 35318389700; e-mail NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Anton S. Derkachev – Junior Researcher, A.A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Engineer, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6101-6573, Scopus ID 57223290521; e-mail Derkachyovas@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию 17.01.2024
Поступила после рецензирования 18.03.2024
Принята к публикации 25.03.2024

Received 17.01.2024
Revised 18.03.2024
Accepted 25.03.2024