

ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 552.331.1:549.643

doi: 10.17223/25421379/35/3

АМФИБОЛСОДЕРЖАЩИЕ ГРАНИТЫ ЗАШИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)



Наталья Викторовна Алымова¹, Александр Александрович Воронцов²,
Дмитрий Алексеевич Лыхин³, Анатолий Викторович Никифоров⁴,
Ольга Андреевна Андреева⁵, Андрей Юрьевич Бычков⁶, Ольга Юрьевна Белозерова⁷,
Виктор Федорович Посохов⁸, Ирина Александровна Сотникова⁹

^{1, 2, 7, 9} Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

^{3, 4, 5} Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

⁶ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁸ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹ alymova@igc.irk.ru

² voront@igc.irk.ru

³ lykhind@rambler.ru

⁴ usn2007b@yandex.ru

⁵ oandreeva@igem.ru

⁶ bychkov@geol.msu.ru

⁷ obel@igc.irk.ru

⁸ vita1@yandex.ru

⁹ sotnikova@igc.irk.ru

Аннотация. Приведены результаты детального минералого-геохимического исследования амфиболсодержащих гранитов Зашихинского месторождения (Восточный Саян). В пределах месторождения установлены кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатой морфологией амфибола и граниты с крупными пойкилокристаллами амфибола. Две морфологические разновидности имеют близкий химический состав и представлены арфведсонитом с высоким содержанием фтора. Сходство вещественных характеристик исследуемых пород указывает на их принадлежность к двум фациальным разновидностям гранитов, которые формировались в рамках одного магматического события из общего источника.

Ключевые слова: щелочные граниты, амфибол, минералогия, редкие элементы, Зашихинское месторождение

Благодарности: статья посвящена памяти доктора геолого-минералогических наук Н.В. Владыкина, уникальная коллекция которого стала основой для научных исследований, также авторы выражают благодарность ЗАО «Техноинвест Альянс» за всестороннюю помощь при проведении полевых экспедиционных работ на Зашихинском месторождении.

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № 0284-2021-0006; экспедиционные работы и изучение геологии района проведены ИГЕМ РАН по теме FMMN-2024-0016.

Для цитирования: Алымова Н.В., Воронцов А.А., Лыхин Д.А., Никифоров А.В., Андреева О.А., Бычков А.Ю., Белозерова О.Ю., Посохов В.Ф., Сотникова И.А. Амфиболсодержащие граниты Зашихинского месторождения (Восточный Саян) // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 34–46. doi: 10.17223/25421379/35/3

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/3

AMPHIBOLE-BEARING GRANITES OF THE ZASHIKHINSKY DEPOSIT (EAST SAYAN)

Natalya V. Alymova¹, Alexander A. Vorontsov², Dmitry A. Lykhin³, Anatoly V. Nikiforov⁴,
Olga A. Andreeva⁵, Andrey Yu. Bychkov⁶, Olga Yu. Belozeroва⁷, Victor F. Posokhov⁸, Irina A. Sotnikova⁹

^{1, 2, 7, 9} A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia

^{3, 4, 5} Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁸ Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹ alymova@igc.irk.ru

² voront@igc.irk.ru

³ lykhind@rambler.ru

⁴ usn2007b@yandex.ru

⁵ oandreeva@igem.ru

⁶ bychkov@geol.msu.ru

⁷ obel@igc.irk.ru

⁸ vital@yandex.ru

⁹ sotnikova@igc.irk.ru

Abstract. The Zashikhinsky tantalum-niobium deposit is located on the territory of the Irkutsk region and is confined to the East Sayan zone of alkaline magmatism. The deposit is caused by agpaite granites and albitites adjacent to mineralogical and petrochemical rocks, amphibole-bearing rocks making up more than 50% of the total alkaline rocks. Rare metal mineralization is represented by columbite, Nb-rutile, zircon, xenotimum-Y, gagarinite-Y. Pyrochlore, fergusonite, monazite, thorite, samarskite, bastnäsite, cryolite and fluorocerite found in the rocks are observed in small quantities and do not affect the noticeable quality of the ores and concentrates of the deposit. To assess the content of components, a quantitative X-ray fluorescence analysis of the samples was carried out on an S4 Pioneer X-ray spectrometer (Bruker, AXS, Germany). The concentrations of 35 trace elements in the rock were measured by ICP-MS method on an Element 2 mass spectrometer. The chemical composition of minerals was determined on a Superprobe JXA-8200 electron probe microanalyzer (JEOL Ltd, Japan). Measurements of the oxygen isotope composition of oxygen in quartz were performed on a Finnigan MAT 253 gas mass spectrometer.

Two varieties of amphibole-containing rare-metal granites have been studied: with an acicular amphibole and with a poikilitic amphibole. The rocks have a similar composition, correspond to the composition of moderately alkaline leucogranites, correspond to high-potassium varieties, are characterized by high iron content and belong to the field of alkali-supersaturated granites. The main geochemical characteristics and mineral composition of the rocks correspond to A-type granites. The studied granites have high concentrations of most incompatible elements (Zr, Hf, Ta, Nb, Th, U, REE), and moderate enrichment in light lanthanides was observed (La/Yb(n) up to 4.16). This distribution significantly distinguishes amphibole alkaline granites from leucocratic varieties of rocks and ores of the deposit, which are characterized by higher concentrations of MREE and HREE. Melanocratic varieties of alkaline granites of the Zashikhinsky deposit contain a large amount of amphibole with a predominant role among dark-colored minerals. In granites, two morphological varieties of amphibole have a similar chemical composition and are represented by arfvedsonite with a high fluorine content. The similarity of the material characteristics of the studied rocks indicates that they belong to two facies varieties of granites, which were formed within the framework of one magmatic event from a common source. The formation of amphibole-containing granites within the framework of a single magmatic event is also indicated by the chemical composition of the main ore mineral columbite and the oxygen isotopic composition of quartz samples from these varieties of deposit rock with similar values in the range from +8.7 to +9.4 ‰ $\delta^{18}\text{O}$.

Keywords: alkaline granites, amphibole, mineralogy, rare elements, Zashikhinsky deposit

Acknowledgments: This article is dedicated to the memory of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences N.V. Vladykin, whose unique collection became the basis for scientific research. The authors also express gratitude to Technoinvest Alliance company for assistance in conducting field expedition work at the Zashikhinsky deposit.

Source of financing: the study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic No. 0284-2021-0006; the expedition work and the study of the geology of the region were conducted by IGEM RAS on the topic No. FMMN-2024-0016.

For citation: Alymova N.V., Vorontsov A.A., Lykhin D.A., Nikiforov A.V., Andreeva O.A., Bychkov A.Y., Belozeroва O.Y., Posokhov V.F., Sotnikova I.A. (2025) Amphibole-bearing granites of the Zashikhinsky deposit (East Sayan). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 34–46. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/3

Введение

Щелочные граниты вызывают научный интерес во многом благодаря обогащению этих пород редкими и редкоземельными элементами, часто с образованием

месторождений комплексной редкометалльной минерализации, которые по масштабам накопления полезных компонентов являются весьма крупными и перспективными объектами. К подобным гранитным проявлениям с промышленным содержанием ниобия

и тантала относится Зашихинское месторождение, приуроченное к Восточно-Саянской зоне щелочного магматизма. Данное тантал-ниобиевое месторождение было открыто в 1971 г., оно расположено на территории Иркутской области в 150 км от г. Нижнеудинска и связано с позднепалеозойскими щелочными гранитами Хайламинского массива. После проведения поисково-оценочных работ массив был охотурен и назван Зашихинским месторождением в память одного из первооткрывателей геолога Нижнеудинской экспедиции Юрия Павловича Зашихина [Архангельская и др., 2012; Бескин, 2014].

С момента открытия Зашихинского месторождения редкометалльные породы традиционно относили к метасоматически измененным щелочным гранитам [Архангельская, Шурига, 1997; Быховский, Потанин, 2009; Архангельская и др., 2012; Бескин, 2014], были выделены следующие типы пород: 1) микроклин-кварц-рибекитовые граниты пегматоидной структуры; 2) рибекитовые граниты, гранит-порфиры (зона IV убогих тантал-ниобиевых руд); 3) протолитионит-рибекит-арфведсонитовые метасоматиты, местами с эгирином (зона III бедных тантал-ниобиевых руд); 4) лейкократовые микроклин-кварц-альбитовые метасоматиты с горошковидным кварцем (зона II рядовых тантал-ниобиевых руд); 5) кварц-альбитовые граниты и альбититы (зона I богатых тантал-ниобиевых руд). Дальнейшие исследования показали, что месторождение сложено агпаитовыми гранитами и альбититами с рядом минералогических и петрохимических особенностей. Ведущая роль при образовании редкометалльной минерализации была отведена длительной кристаллизационной дифференциации расплава с закономерным накоплением несовместимых элементов к конечным продуктам магматического процесса [Бескин, 2014; Vladykin et al., 2016; Yarmolyuk et al., 2016; Перфильев и др., 2017; Alymova, Vladykin, 2021; Альмова и др., 2022].

Важное значение для понимания процессов, ответственных за формирование Зашихинского месторождения, приобретают исследования минералогических особенностей двух разновидностей амфиболсодержащих гранитов. Для их сравнения мы использовали комплексный подход, включающий, помимо геохимических исследований щелочных пород, изучение составов амфибола и колумбита (главного рудного минерала месторождения), а также сопоставление изотопного состава кислорода в кварце.

Краткая геологическая характеристика Зашихинского месторождения

Зашихинское месторождение (Хайламинский массив) приурочено к зоне Главного Саянского разлома,

на участке сочленения Бирюсинского выступа Сибирского кратона и Дербинского блока Саяно-Енисейского аккреционного пояса. Месторождение характеризуется самыми высокими содержаниями тантала в России [Машковцев и др., 2011] и сложено щелочными гранитами и альбититами, обогащенными редкими и редкоземельными элементами. В плане месторождение имеет эллипсовидную, вытянутую в северо-западном направлении форму, его площадь составляет около 1,3 км² [Vladykin et al., 2016]. Изотопно-геохронологические исследования показали позднепалеозойский возраст пород Зашихинского месторождения (Хайламинского массива) [Архангельская, Шурига, 1997; Kostitsyn, Altukhov, 2004]. Вмещающие интрузивные породы представлены гранитами саянского комплекса, гранитами, сиенитами, граносиенитами огнитского комплекса, диоритами, гранодиоритами хойтоокинского (урдаокинского) комплекса. Контакты массива с вмещающими комплексами пород крутопадающие (50–80°) и имеют секущий характер [Vladykin et al., 2016].

На основе литературных данных и проведенных полевых экспедиционных работ нами выделены следующие разновидности пород в пределах Зашихинского месторождения (рис. 1): 1) микроклин-кварц-рибекитовые граниты пегматоидной структуры (только по работам В.В. Архангельской с соавторами [2012]); 2) кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатым амфиболом; 3) кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом; 4) кварц-альбит-микроклиновые лейкограниты; 5) кварц-альбитовые граниты и альбититы. Границы между разновидностями пород постепенные. Амфиболсодержащие граниты составляют более 50 % объема щелочных пород Зашихинского месторождения.

Граниты Зашихинского месторождения характеризуются массивной текстурой и гипидиоморфнозернистой структурой и, как правило, являются крупно-среднезернистыми разновидностями. В зависимости от типа гранитов наблюдаются вариации содержаниями порообразующих и акцессорных минералов [Vladykin et al., 2016; Альмова и др., 2021]. Редкометалльная минерализация представлена колумбитом, Nb-рутилом, цирконом, ксенотимом-У, гагаринитом-У [Alymova, Vladykin, 2021]. Установленные в породах пироксенол, фергусонит, монацит, торит, самарскит, бастнезит, криолит, флюоцерит отмечаются в незначительных количествах и заметного влияния на качество руд и концентратов месторождения не оказывают [Архангельская и др., 2012].

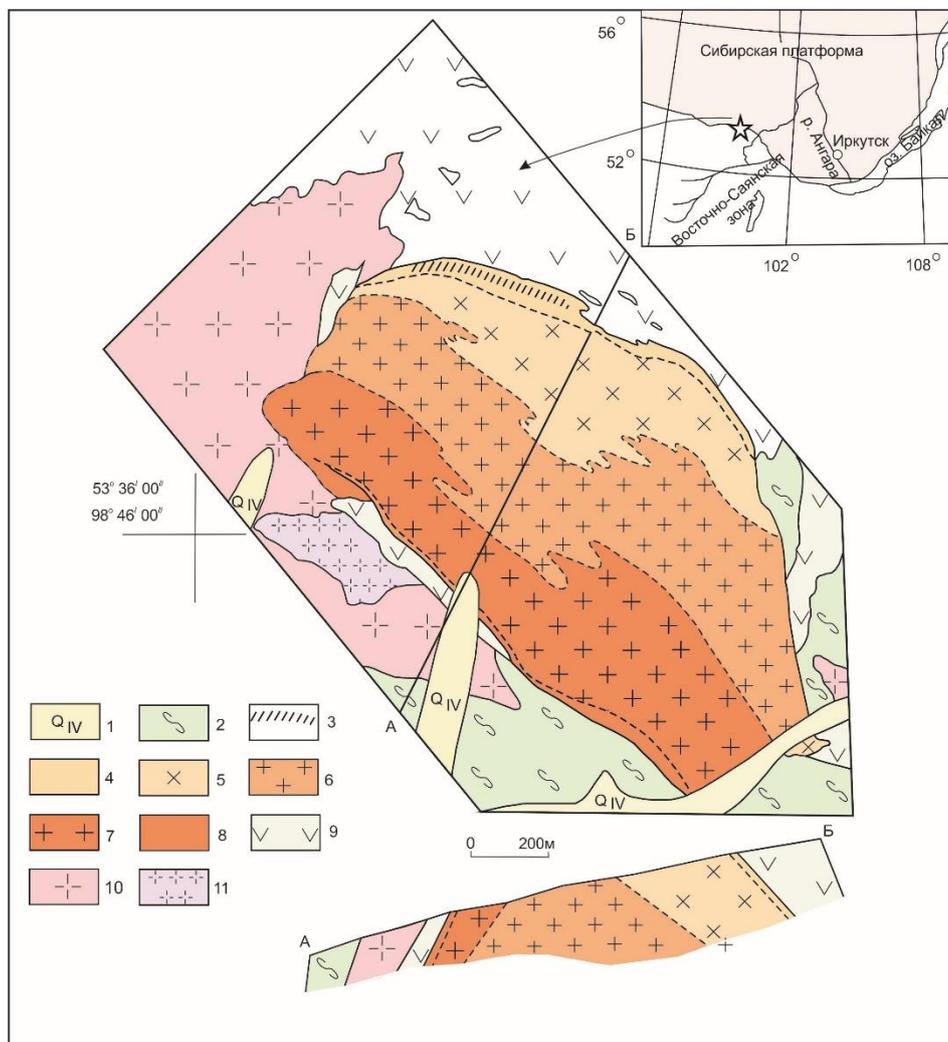
Методы исследования

Аналитические исследования проводились с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН

(г. Иркутск) и ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

Для оценки содержания компонентов в исследуемых образцах был проведен количественный рентгенофлуоресцентный анализ на рентгеновском волнодисперсионном спектрометре S4 Pioneer (Bruker

AXS, Германия) с рентгенооптической схемой по Соллеру, оснащенном рентгеновской трубкой с Rh-анодом мощностью 4 кВт. Материал для измерения приготовлен прессованием порошковой пробы на подложке из борной кислоты, масса навески составляла 2 г.



Р и с . 1. Схема геологического строения Зашихинского месторождения [Архангельская и др., 2012, Перфильев и др., 2017 с изменениями авторов]

1 – четвертичные отложения; 2 – сланцы, микрогнейсы, амфиболиты бирюсинской свиты; 3–8 – Зашихинское месторождение: 3 – область формирования пород с высоким содержанием флюорита и рудных минералов, 4 – кварц-альбитовые граниты и альбититы, 5 – кварц-альбит-микроклиновые лейкограниты, 6 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с крупнолейстовым пойкилитовым амфиболом, 7 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатым амфиболом, 8 – микроклин-кварц-рибекитовые граниты пегматоидной структуры; 9 – граниты, сиениты, граносиениты огнитского интрузивного комплекса; 10 – диориты хойто-окинского (урдаокинского) интрузивного комплекса; 11 – пегматоидные амфиболовые граниты саянского интрузивного комплекса

Fig. 1. The scheme of the geological structure of the Zashikhinsky deposit [Arkhangelskaya et al., 2012, Perfiliev et al., 2017 with changes by the authors]

1 – quaternary deposits; 2 – shales, microgneisses, amphibolites of the Biryusinsk formation; 3–8 – Zashikhinsky deposit: 3 – the area of formation of rocks with a high content of fluorite and ore minerals, 4 – quartz-albite granites and albitites, 5 – quartz-albite-microcline leucogranites, 6 – quartz-microcline-albite granites with large-laminated poikilitic amphibole, 7 – quartz-microcline-albite granites with a needle amphibole, 8 – quartz-microcline-riebeckite granites of a pegmatoid structure; 9 – granites, syenites, granosyenites of the Ognit intrusive complex; 10 – diorites of the Khoito-Okinsky (Urdaokinsky) intrusive complex; 11 – pegmatoid amphibole granites of the Sayan intrusive complex

Концентрации 35 микроэлементов в породе определены методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения с двойной фокусировкой Element 2. Пробоподготовка осуществлялась методом разложения при сплавлении с флюсом – метаборатом лития (LiBO_2) в соотношении 1 : 2. Масса навески – 0,1 г.

Минералого-петрографические исследования пород проводились с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX51 (США) и аппаратно-программного комплекса для анализа изображений ImageScope M.

Определение химического состава минералов выполнено на электронно-зондовом микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония): ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 20 нА, диаметр зонда – 1 мкм. Экспозиция измерения интенсивностей на пике аналитической линии элементов составила 10 с, фон – 5 с. Используемые стандарты: F – флогопит; Na – альбит; Mg – оливин CH-1; Al, Cr – пироп C-153; K – ортоклаз; Si, Ca – голубой диопсид; Ti – рутил TiO_2 ; Mn – Mn-гранат; Fe – NiFe_2O_4 ; Zn – ZnS; Nb – Nb-металлический; Ta – Ta_2O_5 . Предел обнаружения составляет 0,1 мас. %.

Измерения изотопного состава кислорода в кварце выполнялись на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 (США). Для анализа были отобраны монофракции чистого кварца массой навески 2,5 мг. Пробоподготовка проводилась с использованием метода лазерного фторирования в режиме «лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов» в присутствии реагента BrF_5 по методике [Sharp, 1990]. Расчеты $\delta^{18}\text{O}$ выполнены относительно международных стандартов NBS-28 (кварц). Аналитическая погрешность для $\delta^{18}\text{O}$ составила $(1s) \pm 0,2$ ‰.

Минералого-петрографическая характеристика амфиболсодержащих гранитов

В пределах Зашихинского месторождения среди всех редкометалльных щелочных пород выделены три разновидности амфиболсодержащих гранитов: 1) пегматоидные микроклин-кварц-рибекитовые; 2) кварц-микроклин-альбитовые с игольчатым амфиболом; 3) кварц-микроклин-альбитовые с пойкилитовым амфиболом. Однако небольшая оторочка пород микроклин-кварц-рибекитовых гранитов пегматоидной структуры на юго-западном эндоконтакте месторождения [Архангельская и др., 2012] экспедиционными полевыми отрядами в период 2014–2022 гг. найдена не была. Поэтому в данной статье проведено минералого-геохимическое сопоставление только двух типов амфиболсодержащих гранитов, слагающих основной объём Зашихинского месторождения.

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с тонко-игольчатым амфиболом (рибекитовые граниты, гранит-порфиры [Архангельская и др., 2012]) прослеживаются в юго-западной части месторождения (см. рис. 1) и представляют собой полнокристаллическую крупно-среднезернистую породу с массивной текстурой, сложенную кварцем (~ 30–35 об. %), микроклином (~ 25–35 об. %), альбитом (~ 10–15 об. %), амфиболом щелочного ряда (~ 10 об. %) (рис. 2, a). В качестве аксессуарных минералов установлены колумбит, циркон, литиевая слюда, торит, монацит, пироксолол, REE-карбонаты.

Амфибол в породе присутствует в значимых количествах и преобладает над другими темноцветными минералами. В образцах распределен равномерно, образует хаотично ориентированные тонкоигольчатые кристаллы размером до 10 мм в базисе салических минералов (рис. 2, a). В породе – черный непрозрачный, в шлифах минерал отличается отчетливо выраженным плеохроизмом: от индигово-синего по Nr до сине-зеленого по Ng (рис. 2, b).

Амфибол имеет однородный химический состав. Минерал характеризуется высокими содержаниями щелочей (более 10 мас. % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) с преобладанием натрия, железа (до 29,65 мас. % FeO общ), алюминия (до 1,92 мас. %), фтора (до 3,0 мас. %), низкими концентрациями магния (до 0,09 мас. % MgO) и титана (до 0,14 мас. % TiO_2), отсутствием кальция. Расчет формульных коэффициентов проводился согласно программе [Li et al., 2020]. Представительные анализы компонентов в пределах каждого исследуемого зерна амфибола приведены в табл. 1.

Ранее минерал в данной разновидности гранитов диагностировался как рибекит [Архангельская и др., 1997, 2012]. По результатам проведенных электронно-зондовых исследований (рис. 2, c) он относится к подгруппе Na-амфиболов и представлен арфведсонитом с высоким содержанием F > 1 ф.е. (фтор-арфведсонитом) (рис. 3, a) [Leake et al., 2003; Hawthorne et al., 2012]. Моноклинные амфиболы подобного состава характерны для щелочных агапитовых пород, в том числе для гранитов и метасоматитов и, как правило, содержат повышенные концентрации Li [Sharygin et al., 2016]. В игольчатом фтор-арфведсоните в гранитах Зашихинского месторождения содержания Li_2O достигают 0,49 мас. % [Архангельская и др., 2012], поэтому для полученных данных возможны небольшие корректировки в расчете формульных коэффициентов и в структурной формуле.

При сопоставлении двух типов гранитов, помимо щелочного амфибола, особое внимание было уделено колумбиту – главному рудному минералу месторождения, который встречается во всех разновидностях пород.

В щелочных гранитах с игольчатым амфиболом он образует равномерную вкрапленность, размер гипидиоморфных зерен составляет 0,2–0,5 мм и представлен колумбитом-Mn (рис. 3, b): Ta/(Ta+Nb) = 0,03–0,1 и Mn/(Mn+Fe) = 0,61–0,82. Колумбит характеризуется повышенными содержаниями Nb₂O₅ (до 76,29 мас. %), FeO (до 8,05 мас. %), MnO (до

14,83 мас. %), также установлены TiO₂ (до 1,84 мас. %), Ta₂O₅ (до 6,54 мас. %), ZnO (до 0,16 мас. %).

Также было проведено изучение изотопного состава кислорода в образцах кварца из гранитов с игольчатым амфиболом (ЗШХ-701/4 и ЗШХ-39/22), который показал утяжеленный (коровый) изотопный состав со значениями +8,7 ‰ δ¹⁸O и +9,4 ‰ δ¹⁸O соответственно.

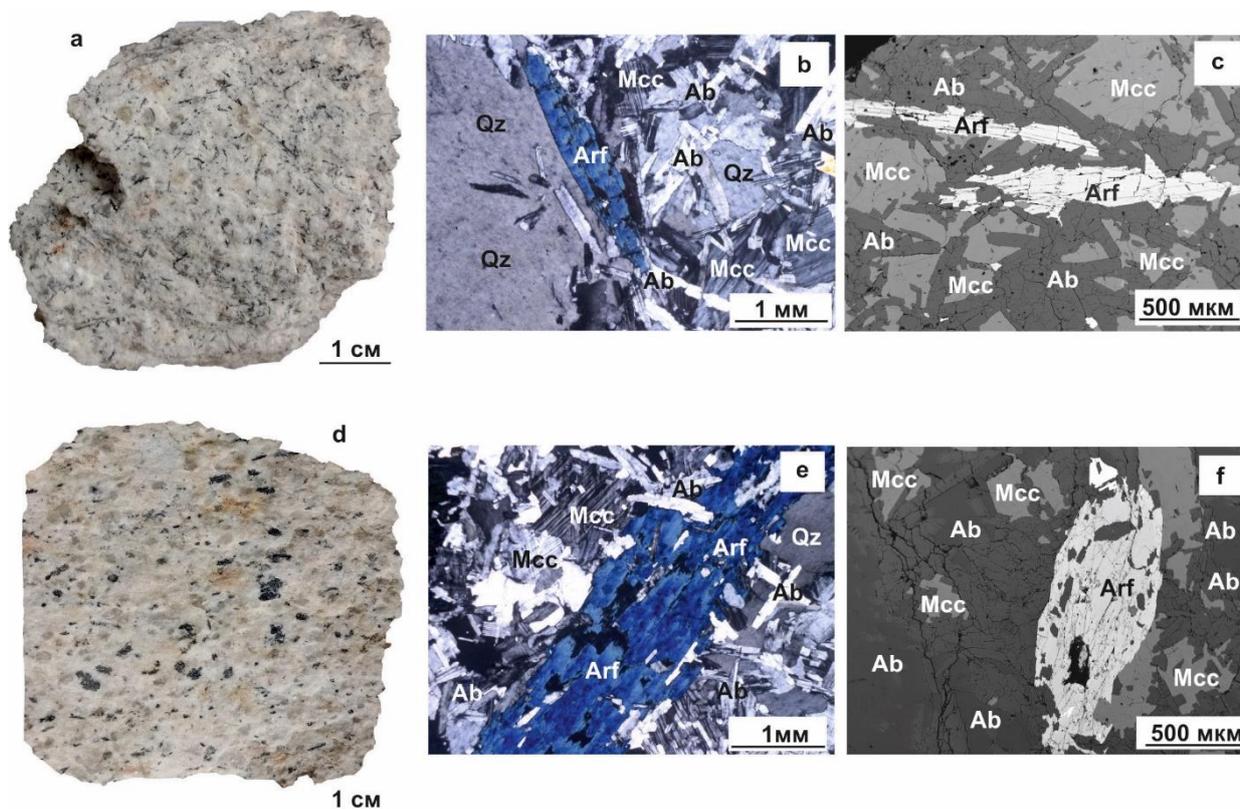


Рис. 2. Щелочные граниты Зашихинского месторождения

a–c – гранит с игольчатым амфиболом: a – фотография образца, b – микрофотография шлифа, c – электронно-зондовое изображение (BSE); d–f – гранит с пойкилитовым амфиболом: d – фотография образца, e – электронно-зондовое изображение (BSE), f – микрофотография шлифа. Ab – альбит, Arf – арфведсонит, Mcc – микроклин, Qz – кварц

Fig. 2. Alkaline granites of the Zashikhinsky deposit

a–c – granite with acicular amphibole: a – photo of the granite, b – thin-section photomicrograph, c – back-scattered electron (BSE) image; d–f – granite with poikilitic amphibole: d – photo of the granite, e – back-scattered electron (BSE) image, f – thin-section photomicrograph. Ab – albite, Arf – arfvedsonite, Mcc – microcline, Qz – quartz

Таблица 1
Представительные анализы Na-амфиболов из гранитов Зашихинского месторождения, мас. %
Table 1
Representative analyzes of Na-amphiboles from granites of the Zashikhinsky deposit, wt. %

Компонент	Игольчатый амфибол										
	Образец ЗШХ-701/4 (зерно 1)						Образец ЗШХ-701/4 (зерно 2)				
	т. 1	т. 2	т. 4	т. 11	т. 12	т. 13	т. 29	т. 30	т. 34	т. 37	т. 39
SiO ₂	51,00	50,20	49,20	50,46	51,32	50,48	50,87	51,02	51,22	50,22	51,28
TiO ₂	0,17	0,10	0,16	0,13	0,10	0,15	0,10	0,14	0,12	0,05	0,13
Al ₂ O ₃	1,62	1,53	1,61	1,64	1,54	1,61	1,64	1,69	1,74	1,75	1,92
Cr ₂ O ₃	0,02	–	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	–	–	–	–
FeO _{общ}	29,36	29,48	29,48	29,49	29,56	29,61	29,07	29,12	29,48	28,78	29,07
MnO	2,47	2,56	2,51	2,56	2,52	2,54	2,57	2,50	2,47	2,49	2,72
ZnO	0,98	0,98	1,01	1,00	1,03	1,07	1,11	1,10	1,10	0,93	1,44
MgO	0,02	0,06	–	0,06	0,11	–	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05

Игольчатый амфибол											
Компонент	Образец ЗШХ-701/4 (зерно 1)						Образец ЗШХ-701/4 (зерно 2)				
	т. 1	т. 2	т. 4	т. 11	т. 12	т. 13	т. 29	т. 30	т. 34	т. 37	т. 39
CaO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Na ₂ O	9,82	9,90	9,91	10,10	9,47	10,04	9,85	9,68	9,93	9,60	9,46
K ₂ O	1,29	1,36	1,41	1,44	1,43	1,42	1,41	1,37	1,25	1,34	1,33
Ta ₂ O ₅	–	0,03	–	–	–	–	0,02	–	0,05	0,03	–
F	2,63	2,72	2,45	2,86	2,79	2,82	2,79	2,76	2,86	2,93	2,30
–O=F ₂	1,11	1,15	1,03	1,20	1,17	1,19	1,17	1,16	1,20	1,23	0,97
<i>Сумма</i>	98,27	97,77	96,72	98,57	98,73	98,56	98,3	98,26	99,07	96,93	98,73
FeO расч	20,01	19,63	19,52	19,78	20,01	19,91	19,61	19,80	20,10	19,41	19,23
Fe ₂ O ₃ расч	10,39	10,95	11,06	10,79	10,61	10,78	10,51	10,36	10,42	10,41	10,93
H ₂ O расч	1,11	1,07	1,19	1,01	1,02	1,02	1,06	1,06	1,00	1,00	1,26
Формульные коэффициенты, рассчитанные по [Li et al., 2020]*											
Si	7,862	7,793	7,713	7,796	7,891	7,803	7,852	7,869	7,865	7,821	7,873
Al	0,083	0,160	0,246	0,149	0,051	0,143	0,093	0,075	0,079	0,134	0,074
Ti	0,020	0,012	0,013	0,015	0,012	0,017	0,012	0,016	0,014	0,006	0,015
<i>Сумма T</i>	7,965	7,965	7,972	7,960	7,954	7,963	7,957	7,961	7,958	7,961	7,962
Ti	–	–	0,006	–	–	–	–	–	–	–	–
Al	0,211	0,120	0,051	0,150	0,228	0,151	0,206	0,232	0,236	0,187	0,273
Cr	0,002	–	0,001	0,004	0,004	0,001	0,001	–	–	–	–
Fe ³⁺	1,326	1,402	1,423	1,382	1,345	1,379	1,351	1,325	1,325	1,343	1,390
Zn	0,112	0,112	0,117	0,114	0,117	0,122	0,126	0,125	0,125	0,107	0,163
Mn ²⁺	0,281	0,290	0,286	0,291	0,284	0,289	0,292	0,284	0,281	0,281	0,306
Fe ²⁺	2,838	2,795	2,791	2,816	2,817	2,830	2,799	2,813	2,842	2,782	2,717
Mg	0,005	0,014	–	0,014	0,025	–	0,009	0,009	0,011	0,009	0,011
Ta	–	0,001	–	–	–	–	0,001	–	0,002	0,001	–
<i>Сумма C</i>	4,774	4,735	4,675	4,771	4,821	4,771	4,785	4,788	4,822	4,710	4,861
Mn ²⁺	0,041	0,047	0,048	0,044	0,044	0,044	0,044	0,043	0,041	0,047	0,047
Na	2,293	2,281	2,265	2,306	2,55	2,300	2,313	2,291	2,296	2,277	2,275
<i>Сумма B</i>	2,335	2,328	2,312	2,350	2,299	2,343	2,358	2,334	2,336	2,324	2,322
Na	0,642	0,698	0,748	0,719	0,568	0,709	0,635	0,604	0,661	0,622	0,541
K	0,267	0,283	0,294	0,296	0,293	0,292	0,290	0,282	0,258	0,280	0,275
<i>Сумма A</i>	0,909	0,981	1,042	1,015	0,861	1,002	0,925	0,886	0,919	0,902	0,815
OH	1,146	1,113	1,246	1,043	1,045	1,054	1,095	1,088	1,027	1,039	1,292
F	1,166	1,210	1,093	1,273	1,234	1,255	1,239	1,224	1,270	1,306	1,007
<i>Сумма W</i>	2,312	2,323	2,339	2,316	2,279	2,309	2,333	2,312	2,297	2,345	2,299

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Пойкилитовый амфибол												
Компонент	Образец ЗШХ-707 (зерно 1)								ЗШХ-707 (зерно 2)			
	т. 2	т. 4	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10	т. 12	т. 14	т. 15	т. 48	т. 49	т. 50
SiO ₂	50,78	51,33	51,33	50,95	50,70	52,24	50,49	50,95	51,05	50,80	50,60	50,49
TiO ₂	0,06	0,08	0,08	0,05	–	–	0,01	0,10	0,07	0,06	0,03	–
Al ₂ O ₃	1,48	1,74	1,87	2,05	1,87	1,81	1,89	1,79	1,85	1,87	2,00	1,85
Cr ₂ O ₃	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–	0,01	–	–
FeO общ	33,05	32,07	29,88	29,89	29,25	28,66	31,76	29,15	29,61	30,57	29,38	29,80
MnO	1,46	1,49	2,72	2,63	2,58	2,62	1,96	2,66	2,63	2,38	2,35	2,39
ZnO	1,70	1,69	1,35	1,15	0,94	1,06	1,63	1,20	1,50	0,86	1,53	1,50
MgO	–	–	0,04	0,07	0,03	0,11	0,03	0,01	0,01	0,05	–	–
CaO	–	–	0,08	0,14	–	–	–	0,03	–	0,02	–	–
Na ₂ O	8,40	9,25	9,83	9,82	10,18	9,27	9,06	9,98	9,46	9,51	9,18	9,47
K ₂ O	1,92	1,92	1,38	1,36	1,60	1,72	1,47	1,36	1,41	1,42	1,94	1,85
Ta ₂ O ₅	–	–	0,06	0,03	0,04	–	–	–	–	–	0,01	–
F	0,98	1,40	2,30	2,53	2,64	2,54	1,49	2,68	2,29	2,80	2,23	2,02
–O=F ₂	0,41	0,59	0,97	1,07	1,11	1,07	0,63	1,13	0,96	1,18	0,94	0,85
<i>Сумма</i>	99,42	100,38	99,96	99,6	98,72	98,96	99,16	98,78	98,92	99,17	98,31	98,52
FeO расч	24,02	23,75	19,72	19,79	19,68	19,54	22,05	19,47	19,68	20,69	20,16	20,26
Fe ₂ O ₃ расч	10,03	9,24	11,29	11,22	10,64	10,13	10,79	10,76	11,03	10,98	10,24	10,60
H ₂ O расч	1,68	1,57	1,25	1,13	1,15	1,19	1,51	1,11	1,25	0,95	1,29	1,39
Формульные коэффициенты, рассчитанные по (Li et al., 2020)*												
Si	7,843	7,865	7,842	7,808	7,807	7,974	7,790	7,839	7,851	7,814	7,834	7,809
Al	0,082	0,047	0,100	0,138	0,131	–	0,153	0,106	0,095	0,132	0,099	0,126
Ti	0,007	0,009	0,009	0,006	–	–	0,001	0,012	0,008	0,007	0,003	–

Компонент	Пойкилитовый амфибол											
	Образец ЗШХ-707 (зерно 1)									ЗШХ-707 (зерно 2)		
	т. 2	т. 4	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10	т. 12	т. 14	т. 15	т. 48	т. 49	т. 50
Сумма T	7,931	7,922	7,951	7,952	7,938	7,974	7,944	7,957	7,954	7,953	7,936	7,935
Al	0,188	0,267	0,237	0,232	0,208	0,326	0,190	0,219	0,240	0,207	0,266	0,212
Cr	–	–	0,001	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe ³⁺	1,201	1,125	1,425	1,414	1,367	1,293	1,317	1,380	1,395	1,371	1,301	1,344
Zn	0,194	0,191	0,152	0,130	0,107	0,119	0,186	0,136	0,170	0,098	0,175	0,171
Mn ²⁺	0,174	0,181	0,308	0,297	0,295	0,297	0,226	0,302	0,297	0,269	0,269	0,275
Fe ²⁺	3,196	3,213	2,765	2,773	2,811	2,772	2,992	2,774	2,767	2,868	2,844	2,854
Mg	–	–	0,009	0,016	0,007	0,025	0,007	0,002	0,002	0,011	–	–
Ta	–	–	0,001	0,001	0,001	–	–	–	–	–	0,001	–
Сумма С	4,953	4,977	4,897	4,862	4,795	4,832	4,918	4,813	4,872	4,824	4,855	4,855
Mn ²⁺	0,017	0,012	0,044	0,044	0,041	0,042	0,030	0,045	0,046	0,041	0,039	0,039
Na	2,019	2,160	2,283	2,261	2,349	2,320	2,104	2,323	2,255	2,194	2,254	2,265
Сумма В	2,036	2,173	2,327	2,305	2,390	2,362	2,134	2,368	2,300	2,235	2,293	2,304
Na	0,497	0,588	0,629	0,656	0,690	0,423	0,607	0,654	0,566	0,642	0,502	0,575
K	0,379	0,376	0,282	0,279	0,324	0,345	0,298	0,280	0,290	0,291	0,389	0,371
Сумма А	0,876	0,964	0,911	0,936	1,015	0,768	0,904	0,934	0,856	0,933	0,890	0,946
ОН	1,729	1,601	1,273	1,155	1,184	1,213	1,559	1,142	1,286	0,980	1,330	1,435
F	0,425	0,619	1,007	1,115	1,173	1,116	0,651	1,186	1,005	1,241	0,987	0,892
Сумма W	2,154	2,220	2,280	2,270	2,357	2,329	2,210	2,328	2,291	2,221	2,317	2,327

* Возможны корректировки в расчетных формульных коэффициентах, так как содержание Li₂O не оценивалось.

* Adjustments to the calculated formula coefficients are possible, since the Li₂O content was not estimated.

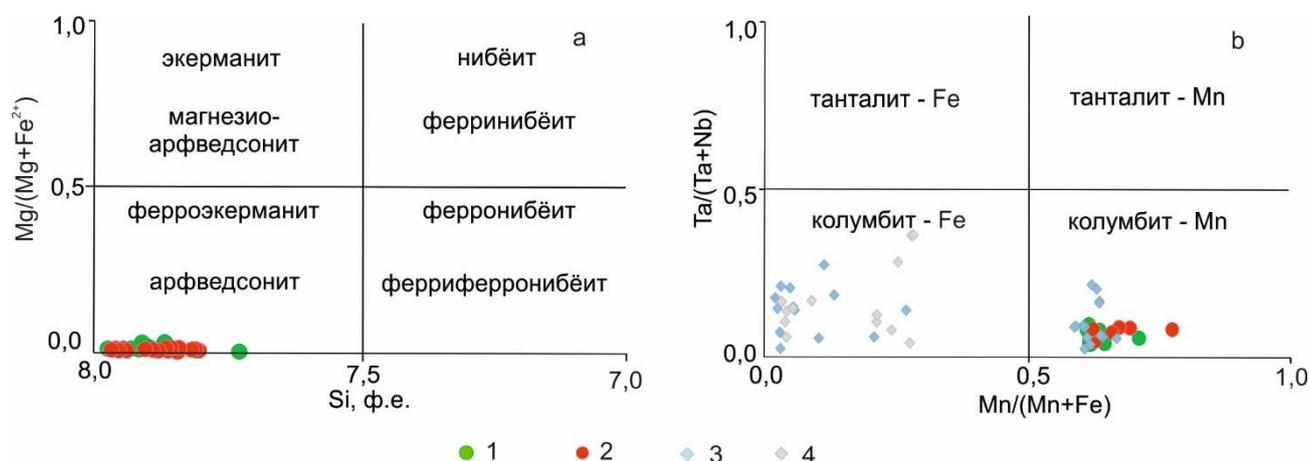


Рис. 3. Составы амфиболов (а) и колумбитов (б) из щелочных пород Зашихинского месторождения

1 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с иголецким амфиболом; 2 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом; 3 – кварц-альбит-микроклиновые лейкограниты [Vladykin et al., 2016]; 4 – кварц-альбитовые граниты и альбититы [Vladykin et al., 2016]

Fig. 3. Compositions of amphiboles (a) and columbites (b) from alkaline rocks of the Zashikhinsky deposit

1 – quartz-microcline-albite granites with acicular amphibole; 2 – quartz-microcline-albite granites with poikilitic amphibole; 3 – quartz-albite-microcline leucogranites [Vladykin et al., 2016]; 4 – quartz-albite granites and albitites [Vladykin et al., 2016]

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом (протолитионит-рибекит-арфведсонитовые метасоматиты [Архангельская и др., 2012]) наблюдаются в центральной части месторождения (см. рис. 1) и являются крупно-среднезернистой породой с массивной текстурой и сложены микроклином, альбитом и кварцем. Минеральный состав породы близок щелочным гранитам с иголецким амфиболом. В изученных гранитах содержание амфибола составляет ~ 5–10 об. %, он кристаллизуется в виде пойкилокристаллов размером до 10 мм

(см. рис. 2, d). Часто в амфиболе фиксируются включения гипидиоморфных зерен колумбита как мелких (около 10 мкм), так и более крупных (100–400 мкм), а также включения и вроски альбита и кварца. В породе амфибол – черный непрозрачный, в шлифах характерен ярко выраженный плеохроизм: от индиго-синего по Np до сине-зеленого по Ng (рис. 2, e).

Минерал имеет однородный химический состав, характеризуется высокими содержаниями Na₂O (до 10,18 мас. %), FeO (до 33,93 мас. %), F (до 2,80 мас. %) и низкими концентрациями MgO (до 0,05 мас. %),

TiO₂ (до 0,14 мас. %). Также определен Li₂O до 0,53 мас. % [Архангельская и др., 2012]. От игольчатого амфибола отличается незначительными содержаниями CaO (до 0,02 мас. %) и слегка повышенными расчетными значениями соотношений окисного и закисного железа и H₂O (см. табл. 1). Установленный химический состав минерала идентичен составу амфибола из шлиховых проб данного типа гранитов, изученный ранее коллективом авторов [Vladykin et al., 2016]. Согласно классификации IMA, относится к группе Na-амфиболов и представлен арфведсонитом (фтор-арфведсонитом) (см. рис. 3, а) [Leake et al., 2003; Hawthorne et al., 2012]. Таким образом, обе морфологические разновидности амфибола имеют близкий химический состав и на диаграммах образуют единый тренд.

Основной рудный минерал данных гранитов также представлен колумбитом-Mn: Ta/(Ta+Nb) = 0,05–0,07 и Mn/(Mn+Fe) = 0,62–0,77. Гипидиоморфные зерна (размером до 0,5 мм) встречаются в породе в виде равномерной вкрапленности в матрице породообразующих минералов, а также в качестве включений разной размерности в пойкилокристаллах амфибола. В минерале установлены повышенные концентрации Nb₂O₅ (до 75,35 мас. %), FeO (до 7,88 мас. %), MnO (до 14,83 мас. %), Ta₂O₅ (до 5,67 мас. %). В целом колумбиты из двух разновидностей амфиболсодержащих гранитов месторождения имеют близкий химический состав и на бинарных диаграммах образуют единое поле фигуративных точек (рис. 3, b). Колумбит-Fe, установленный в кварц-альбитовых гранитах и лейкократовых гранитах с горошковидным кварцем, в амфиболсодержащих породах не обнаружен.

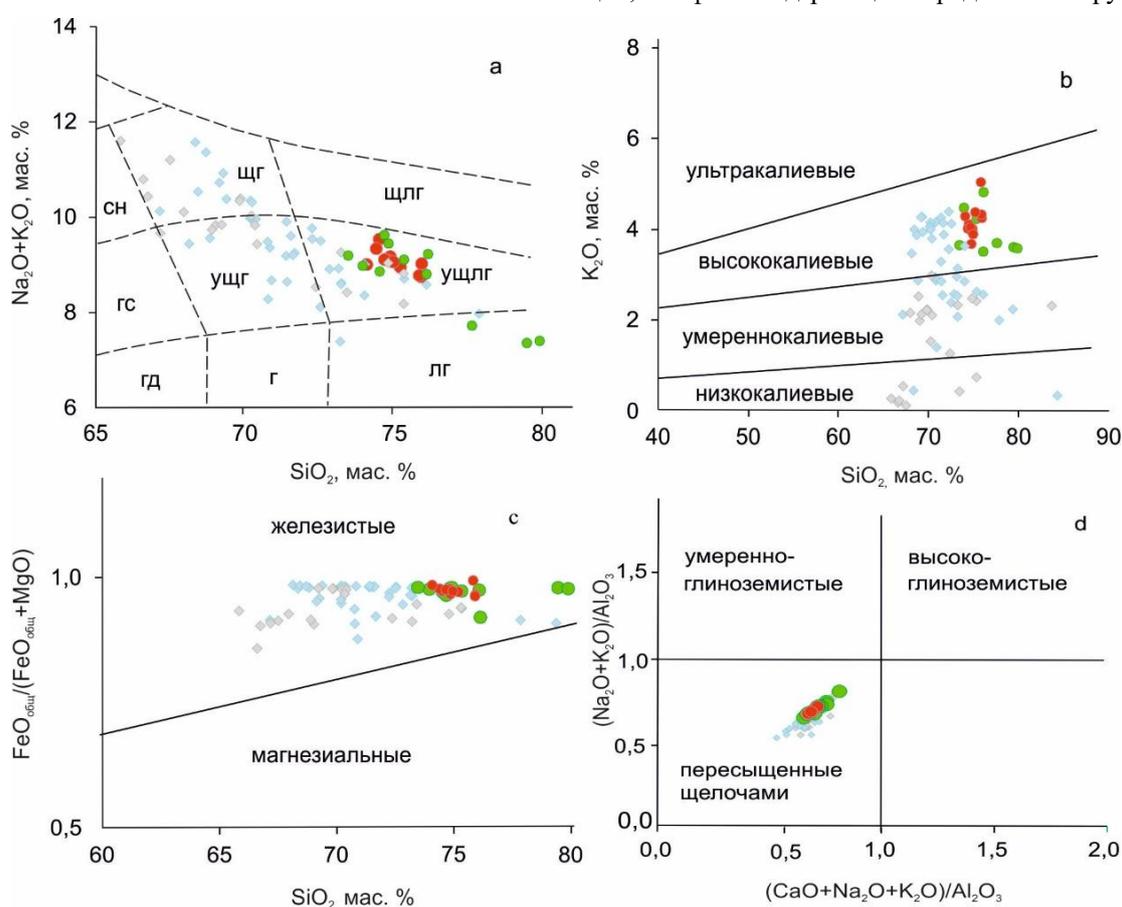


Рис. 4. Петрохимические диаграммы для щелочных пород Зашихинского месторождения

а – диаграмма SiO₂–Na₂O+K₂O [Шарпенюк и др., 2013]: сн – сиениты, щг – щелочные граниты, щлг – щелочные лейкограниты, гс – граносиениты, ущг – умеренно-щелочные граниты, ущлг – умеренно-щелочные лейкограниты, гд – гранодиориты, г – граниты, лг – лейкограниты; б – диаграмма SiO₂–K₂O; в – диаграмма SiO₂–FeO_{общ}/(FeO_{общ} + MgO) [Frost et al., 2001]; д – диаграмма (CaO+Na₂O+K₂O)/Al₂O₃–(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃ [Maniar, Piccolli, 1989]. Составы редкометалльных гранитов приведены в работах [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]. Условные обозначения соответствуют рис. 3

Fig. 4. Petrochemical diagrams for alkaline rocks of the Zashikhinsky deposit

а – SiO₂–Na₂O+K₂O diagram [Sharpenok et al., 2009]: сн – syenites, щг – alkaline granites, щлг – alkaline leucogranites, гс – granosyenites, ущг – moderately alkaline granites, ущлг – moderately alkaline granites, гд – granodiorites, г – granites, лг – leucogranites; б – SiO₂–K₂O diagram; в – SiO₂–FeO_{tot}/(FeO_{tot} + MgO) diagram [Frost et al., 2001]; д – (Na₂O+K₂O)/Al₂O₃–(CaO+Na₂O+K₂O)/Al₂O₃ diagram [Maniar, Piccolli, 1989]. The compositions of the rare-granites are given in the works [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]. The symbols correspond to Fig. 3

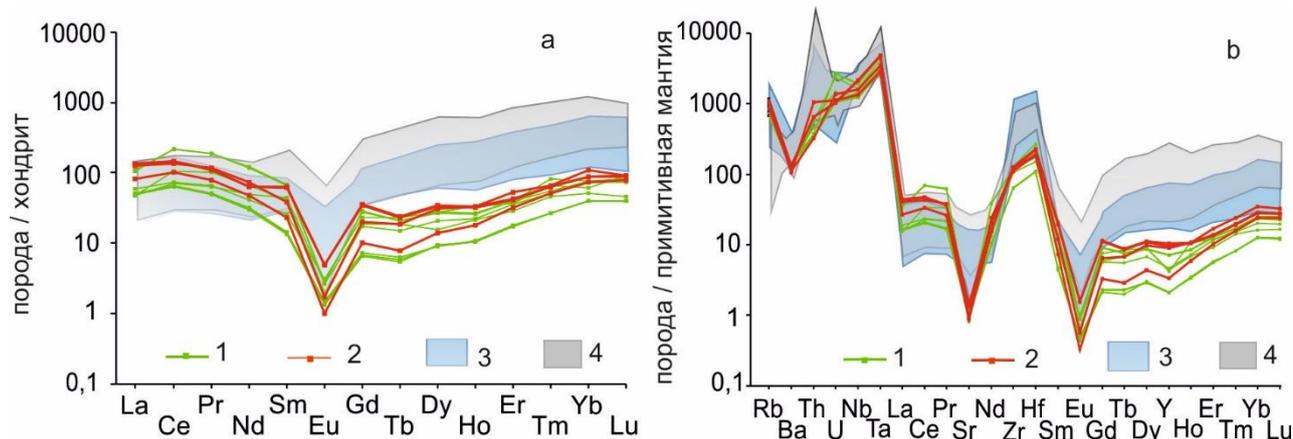


Рис. 5. Распределение микроэлементов в породах Зашихинского месторождения, нормированных на хондрит и состав примитивной мантии [McDonough, Sun, 1995]

1 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатым амфиболом; 2 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом; 3 – поле составов кварц-альбит-микроклиновых лейкогранитов; 4 – поле составов кварц-альбитовых гранитов и альбититов. Составы пород приведены в работах [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]

Fig. 5. Distribution of trace elements in rocks of the Zashikhinsky deposit, normalized for chondrite and composition of the primitive mantle [McDonough, Sun, 1995]

1 – quartz-microcline-albite granites with acicular amphibole; 2 – quartz-microcline-albite granites with poikilitic amphibole; 3 – field of compositions of quartz-albite-microcline leucogranites; 4 – field of compositions of quartz-albite granites and albitites. The compositions of the rocks are given in the works [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]

Образцы кварца (ЗШХ-706, ЗШХ-707, ЗШХ-58/22) из данной разновидности пород также показали утяжеленный изотопный состав кислорода со значениями $+9,2 \delta^{18}\text{O}$, $+8,9 \text{‰} \delta^{18}\text{O}$, $+8,7 \text{‰} \delta^{18}\text{O}$, полученные данные аналогичны изотопному составу кварца из гранитов с игольчатым амфиболом.

Вещественный состав амфиболсодержащих гранитов

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с тонко-игольчатым амфиболом по петрохимическим особенностям отвечают составу умеренно-щелочных лейкогранитов (73,46–79,87 мас. % SiO_2 , 7,15–9,18 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (см. рис. 4, a), на диаграмме SiO_2 – K_2O соответствуют высококалийевым разновидностям (рис. 4, b). Породы характеризуются высокой железистостью (Fe индекс $\sim 0,96$) (рис. 4, c) и относятся к области пересыщенных щелочами гранитов (рис. 4, d). Основные геохимические характеристики и минеральный состав пород массива отвечают гранитам А-типа [Whalen et al., 1987; Bonin, 2007; Frost, Frost, 2001]. В изученных гранитах установлены повышенные содержания большинства несовместимых элементов (Zr, Hf, Ta, Nb, Th, U, REE), концентрации Nb и Ta составляют 582–1476 ppm и 83–195 ppm соответственно. Наблюдается умеренное обогащение легкими лантаноидами

(La/Yb_(n) до 4,16). Подобное распределение значительно отличает щелочные граниты с игольчатым амфиболом от лейкократовых разновидностей пород и руд месторождения, для которых характерны более высокие концентрации MREE и HREE (см. рис. 5, a).

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом соответствуют умеренно-щелочным лейкогранитам (74,07–75,91 мас. % SiO_2 , 8,77–9,33 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (рис. 4, a), характеризуются высокой железистостью (Fe индекс $\sim 0,97$) (рис. 4, b), относятся к высококалийевым разновидностям (рис. 4, c) и области пересыщенных щелочами пород (коэффициенты A/NK и ASI меньше 1,0) (рис. 4, d). Геохимический и минеральный составы позволяют классифицировать породы как граниты А-типа. В изученных породах также установлены повышенные содержания несовместимых элементов [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021], диапазоны концентраций Nb и Ta составляют 809–1595 и 84–201 ppm соответственно. Спектры распределения микроэлементов показали умеренное обогащение LREE (La/Yb_(n) до 5,13) (рис. 5, a) и положительные аномалии Ta, Zr, Hf (рис. 5, b).

Обсуждение

Щелочные граниты с игольчатым и пойкилитовым амфиболом характеризуются близкими петрохимическим и микроэлементным составами, породы об-

разуют единое поле фигуративных точек на различных дискриминационных диаграммах, а спектры распределения редких элементов перекрывают друг друга. Все проанализированные пробы соответствуют умеренно-щелочным лейкогранитам с высокими концентрациями несовместимых элементов, содержания $\Sigma\text{HFSE}+\text{REE}$ достигают ~ 4000 г/т. Обе разновидности амфиболсодержащих гранитов демонстрируют незначительное преобладание LREE над HREE ($\text{La}/\text{Yb}_{(n)}$ достигает ~ 5). В изученных породах наблюдаются резкие отрицательные аномалии Ba, Sr и Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* \sim 0,1$) (см. рис. 5, b), высокие значения $10\,000 \cdot \text{Ga}/\text{Al}$ ($> 2,8$) и $\text{Fe}\#$ ($> 0,9$), характерные для гранитов А-типа. Также только в данных гранитах установлена небольшая отрицательная Y-аномалия, которую можно объяснить фракционированием в высокофтористом расплаве Y-содержащих минералов (например, таких как ксенотим-(Y) или гагаринит-(Y)).

Меланократовые разновидности щелочных гранитов Зашихинского месторождения содержат большое количество амфибола, который в данных породах можно отнести к породообразующим минералам с преобладающей ролью среди темноцветных. Несмотря на смену морфологии, от небольших игольчатых идиоморфных кристаллов амфибола, соразмерных микроклину и кварцу, до минерала пойкилитового облика, полученные аналитические данные показали принадлежность натриевого амфибола к одному минеральному виду, который представлен арфведсонитом с высоким содержанием фтора (более

1 ф.е.). Обе морфологические разновидности амфибола характеризуются повышенным содержанием щелочей при преобладании натрия. Присутствие Zn в структуре минерала ($\sim 0,2$ ф.е.), является показателем низкой f_{S_2} , высокой f_{O_2} , высокой щелочности (апатитности) и флюидонасыщенности среды [Sharygin et al., 2016].

Проведенные исследования показали, что близкие по составу щелочные граниты Зашихинского месторождения содержат амфиболы одного минерального вида. Это указывает на тесную генетическую связь между данными породами и их формирование в рамках одного магматического события. Это подтверждается изотопным составом кислорода в образцах кварца из этих разновидностей пород месторождения, которые обладают близкими значениями в интервале от $+8,7$ до $+9,4$ ‰ $\delta^{18}\text{O}$.

Заключение

Сходство вещественных характеристик исследуемых пород указывает на принадлежность гранитов с тонкоигольчатым арфведсонитом и пойкилитовым арфведсонитом к двум фаціальным разновидностям гранитов, которые формировались в рамках одного магматического события из общего источника. Морфологическое различие амфиболов натриевой подгруппы может быть связано с разной скоростью кристаллизации щелочного расплава: образование пород с тонкоигольчатым арфведсонитом происходило быстрее, чем формирование редкометалльных гранитов с пойкилокристаллами.

Список источников

- Альмова Н.В., Воронцов А.А., Дриль С.И., Сотникова И.А.** Источники и механизмы формирования щелочных редкометалльных гранитов Зашихинского массива на основе геохимических и Nd изотопных данных // Геодинамика и тектонофизика. 2022. № 13 (4). 0648.
- Архангельская В.В., Рябцев В.В., Шурига Т.Н.** Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России. М.: ВИМС, 2012. 191 с.
- Архангельская В.В., Шурига Т.Н.** Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // Отечественная геология. 1997. № 5. С. 7–10.
- Бескин С.М.** Геология и индикаторная геохимия тантал-ниобиевых месторождений России (редкометалльные граниты). М.: Научный мир, 2014. 112 с.
- Быховский Л.З., Потанин С.Д.** Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. М.: ВИМС, 2009. 156 с.
- Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Рогожин А.А., Темнов А.В.** Перспективы рационального освоения комплексных ниобий-тантал-редкоземельных месторождений России // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 9–13.
- Перфильев В. В., Селезнев А. О., Соколов В. Д., Кознов А. В.** Перспективы Зашихинского // Редкие земли. 2017. № 1 (8). С. 142–151.
- Шарпенко Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А.** TAS-диаграмма сумма щелочей – кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 40–50.
- Alymova N.V., Vladykin N.V.** Geochemistry, Mineralogy and Ore Content of Alkaline Granite Magmatism of East Sayan Zone (On the Example of Zashikhinsky Deposit) // Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis. Springer, Cham, 2021. P. 63–80.
- Bonin B.** A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of Concept, Problems and Prospects // Lithos. 2007. V. 97. P. 1–29.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D.** A Geochemical Classification for Granitic Rocks // J. Petrol. 2001. V. 42. P. 2033–2048.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D.** Nomenclature of the amphibole supergroup // Amer. Miner. 2012. V. 97. P. 2031–2048.
- Kostitsyn Yu.A., Altukhov E.N.** The Khäilama and Ayskan massifs of alkali granitoids, Eastern Sayan: age and formation conditions by Rb-Sr isotopic and geochemical data // Geochim. Int. 2004. V. 42, No. 3. P. 195–204.
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A.J., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Whittaker E.J.W.** Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature // Can. Mineral. 2003. V. 41. P. 1355–1370.

- Li X., Zhang Ch., Behrens H., Holtz F. Calculating amphibole formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression // *Lithos*. 2020. V. 362–363. 105469
- Maniar P.D., Piccolli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. № 101. P. 635–643.
- McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. No. 3120. P. 223–253.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. P. 1353–1357.
- Sharygin V.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Rusakov V.S., Ksenofontov D.A., Nigmatulina E.N., Vladykin N.V., Pushcharovsky D.Yu. Lithium-containing Na-Fe-amphibole from cryolite rocks of the Katugin rare-metal deposit (Transbaikalia, Russia): Chemical features and crystal structure // *Russ. Geol. Geophys.* 2016. V. 57, No. 8. P. 1191–1203.
- Vladykin N.V., Alymova N.V., Perfil'ev V.V. Geochemical features of rare-metal granites of the Zashikhinsky massif, Vostochny Sayan // *Petrology*. 2016. V. 24, No. 5. P. 512–525.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical, characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Miner. Petrol.* 1987. V. 95. P. 407–419.
- Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Kozlovsky A.M., Nikiforov A.V., Travin A.V. Composition, sources and mechanisms of formation of rare-metal granitoids of the Late Paleozoic East Sayan zone of alkaline magmatism (on the example of the Ulan-Tologoi massif) // *Petrology*. 2016. V. 24, No. 5. P. 477–496.

References

- Alymova N.V., Vorontsov A.A., Dril S.I., Sotnikova I.A. *Istochniki i mekhanizmy formirovaniya shchelochnyh redkometall'nyh granitov Zashihinskogo massiva na osnove geohimicheskikh i Nd izotopnyh dannyh* [Sources and mechanisms of formation of alkaline rare-metal granites at the Zashikhinsky massif based on geochemical and Nd isotope data] // *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics]. 2022. 13(4). 0648. In Russian
- Arkhangelskaya V.V., Ryabtsev V.V., Shuriga T.N. *Geologicheskoe stroenie i mineralogiya mestorozhdenij tantala Rossii* [Geological structure and mineralogy of tantalum deposits in Russia]. Moscow: VIMS, 2012. 191 p. In Russian
- Arhangel'skaya V.V., Shuriga T.N. *Geologicheskoye stroeniye, zonal'nost' i orudneniye Zashikhinskogo tantal-niobiyevogo mestorozhdeniya* [Geological Features, Zoning, and Mineralization of the Zashikhinsky Tantalum-Niobium Deposit] // *Otechestvennaya geologiya* [National Geology]. 1997. No. 5. pp. 7–10. In Russian
- Beskin S.M. *Geologiya i indikatornaya geohimiya tantal-niobiyevykh mestorozhdenij Rossii (redkometal'nye granity)* [Geology and indicator geochemistry of tantalum-niobium deposits in Russia (rare-metal granites)]. Moscow: Scientific World, 2014. 112 p. In Russian
- Bykhovskiy L.Z., Potanin S.D. *Geologo-promyshlennyye tipy redkometall'nykh mestorozhdenij* [Geological and industrial types of rare metal deposits]. Moscow: VIMS, 2009. 156 p. In Russian
- Mashkovtsev G.A., Bykhovskiy L.Z., Rogozhin A.A., Temnov A.V. *Perspektivy ratsional'nogo osvoeniya kompleksnykh niobiy-tantal-redkozemel'nykh mestorozhdeniy Rossii* [Prospects for the Rational Development of Complex Tantalum-Niobium-REE Ore Deposits of Russia] // *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and Protection of Mineral Resources]. 2011. No. 6. pp. 9–13. In Russian
- Perfil'ev V.V., Seleznev A.O., Sokolov V.D., Koznov A.V. *Perspektivy Zashihinskogo* [Prospects of Zashikhinsky] // *Redkie zemli* [Rare Earths]. 2017. No. 1 (8). pp. 142–151. In Russian
- Sharpenok L.N., Kostin A.E., Kukhareno E.A. *TAS-diagramma summa shchelochey – kremnezem dlya khimicheskoy klassifikatsii i diagnostiki plutonicheskikh porod* [TAS-diagram sum of alkalis – silica for chemical classification and diagnostics of plutonic rocks] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and metallogeny]. 2013. No. 56. pp. 40–50. In Russian
- Alymova N.V., Vladykin N.V. *Geochemistry, Mineralogy and Ore Content of Alkaline Granite Magmatism of East Sayan Zone (On the Example of Zashikhinsky Deposit)* // *Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis*. Springer, Cham. 2021. pp. 63–80. doi: 10.1007/978-3-030-69670-2_4
- Bonin B. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of Concept, Problems and Prospects // *Lithos*. 2007. V. 97. pp. 1–29. doi: 10.1016/j.lithos.2006.12.007
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A Geochemical Classification for Granitic Rocks // *J. Petrol.* 2001. V. 42. pp. 2033–2048. doi:10.1093/petrology/42.11.2033
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. Nomenclature of the amphibole supergroup // *Amer. Miner.* 2012. V. 97. pp. 2031–2048.
- Kostitsyn Yu.A., Altukhov E.N. The Khailama and Ayskan massifs of alkali granitoids, Eastern Sayan: age and formation conditions by Rb-Sr isotopic and geochemical data // *Geochem. Int.* 2004. V. 42. No. 3. pp. 195–204.
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A.J., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Whittaker E.J.W. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature // *Can. Mineral.* 2003. V. 41. pp. 1355–1370.
- Li X., Zhang Ch., Behrens H., Holtz F. Calculating amphibole formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression // *Lithos*. 2020. V. 362–363. 105469. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105469
- Maniar P.D., Piccolli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. № 101. pp. 635–643.
- McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. No. 120. pp. 223–253.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. pp. 1353–1357.
- Sharygin V.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Rusakov V.S., Ksenofontov D.A., Nigmatulina E.N., Vladykin N.V., Pushcharovsky D.Yu. Lithium-containing Na-Fe-amphibole from cryolite rocks of the Katugin rare-metal deposit (Transbaikalia, Russia): Chemical features and crystal structure // *Russ. Geol. Geophys.* 2016. V. 57. No. 8. pp. 1191–1203. doi: 10.1016/j.rgg.2016.08.006
- Vladykin N.V., Alymova N.V., Perfil'ev V.V. Geochemical features of rare-metal granites of the Zashikhinsky massif, Vostochny Sayan // *Petrology*. 2016. V. 24. No. 5. pp. 512–525. doi: 10.1134/S0869591116050052
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical, characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Miner. Petrol.* 1987. V. 95. pp. 407–419.

Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Kozlovsky A.M., Nikiforov A.V., Travin A.V. Composition, sources and mechanisms of formation of rare-metal granitoids of the Late Paleozoic East Sayan zone of alkaline magmatism (on the example of the Ulan-Tologoi massif) // *Petrology*. 2016. V. 24. No. 5. p.p. 477–496. doi:10.1134/S0869591116050076

Информация об авторах:

Алымова Н.В., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: alymova@igc.irk.ru

Воронцов А.А., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: voront@igc.irk.ru

Лыхин Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория редкометального магматизма, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия.

E-mail: lykhind@rambler.ru

Никифоров А.В., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория редкометального магматизма, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия.

E-mail: usn2007b@yandex.ru

Андреева О.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория редкометального магматизма, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия.

E-mail: oandreeva@igem.ru

Бычков А.Ю., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геохимии, геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

E-mail: bychkov@geol.msu.ru

Белозерова О.Ю., кандидат химических наук, старший научный сотрудник, лаборатория рентгеновских методов анализа, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: obel@igc.irk.ru

Посохов В.Ф., старший научный сотрудник, лаборатория инструментальных методов анализа, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: vital@yandex.ru

Сотникова И.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: sotnikova@igc.irk.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Alymova N.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: alymova@igc.irk.ru

Vorontsov A.A., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: voront@igc.irk.ru

Lykhin D.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Rare Metal Magmatism, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia.

E-mail: lykhind@rambler.ru

Nikiforov A.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Rare Metal Magmatism, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia.

E-mail: usn2007b@yandex.ru

Andreeva O.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Rare Metal Magmatism, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia.

E-mail: oandreeva@igem.ru

Bychkov A.Y., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of the Department of Geochemistry, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

E-mail: bychkov@geol.msu.ru

Belozerova O.Y., Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of X-ray analysis methods, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Russia.

E-mail: obel@igc.irk.ru

Posokhov V.F., Senior Researcher, Laboratory of Instrumental Methods of Analysis, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: vital@yandex.ru

Sotnikova I.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: sotnikova@igc.irk.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 02.09.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 02.06.2025