

Парагенезисы криолитсодержащих гранитов Зашихинского месторождения и их сопоставление с экспериментальными данными в модельной гранитной системе

Казакова А. А.¹, Щекина Т. И.²

¹ *Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва, alexs7975@yandex.ru*

² *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, t-shchekina@mail.ru*

Аннотация. В работе исследованы граниты Зашихинского месторождения, которые относятся к редкометалльным гранитам А-типа. Зашихинское месторождение богато танталом и ниобием, а также цирконием, гафнием, редкоземельными элементами и криолитом. Проведены эксперименты в модельной гранитной системе при 600–800 °С и 1 кбар, в которых показано, что при 800 °С и 1 кбар образуется алюмосиликатно-солевая несмесимость, а при дальнейшей кристаллизации в солевой фазе образуются крупные кристаллы криолита до 100–150 мкм в поперечнике. При исследовании криолитсодержащих гранитов Зашихинского месторождения и экспериментальных образцов удалось доказать, что криолит кристаллизуется из расплава и является породообразующим минералом в гранитах, образующийся в диапазоне температур ~ 600–700 °С при давлении 1 кбар. Солевые фазы, накапливающие редкоземельные элементы и литий, полученные в эксперименте, являются аналогами природных обособлений криолита, характерных для изучаемого месторождения. Другие редкие элементы (Ta, Nb), типичные для Зашихинского месторождения, также тяготеют к изучаемым высокофтористым гранитам. Проведена аналогия между процессами накопления редкоземельных элементов в солевых фазах в эксперименте и в природных криолитсодержащих гранитах.

Ключевые слова: редкометалльные граниты, Зашихинское месторождение, криолит, магматические породы, криолитсодержащие граниты.

Parageneses of cryolite-containing granites of the Zashikhinsky deposit and their comparison with experimental data in a model granite system

Kazakova A. A.¹, Shchekina T. I.²

¹ *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, alexs7975@yandex.ru*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, t-shchekina@mail.ru*

Abstract. This paper examines granites from the Zashikhinsky deposit, which are classified as A-type rare-metal granites. The Zashikhinsky deposit is rich in tantalum and niobium, as well as zirconium, hafnium, rare earth elements, and cryolite. Experiments were conducted in a model granite system at 600–800 °C and 1 kbar. These experiments demonstrated that aluminosilicate-salt immiscibility forms at 800 °C and 1 kbar, and that subsequent cryolite-containing granites from the Zashikhinsky deposit and experimental samples, it was possible to prove that cryolite crystallizes from the melt and is a rock-forming mineral in granites, forming in the temperature range of ~ 600–700 °C at a pressure of 1 kbar. The salt phases accumulating rare earth elements and lithium obtained in the experiment are analogous to natural cryolite segregations characteristic of the studied deposit. Other rare elements (Ta, Nb), typical of the Zashikhinskoye deposit, are also concentrated in the studied high-fluoride granites. A parallel is drawn between the processes of rare earth element accumulation in the salt phases in the experiment and in natural cryolite-containing granites.

Keywords: rare-metal granites, Zashikhinsky deposit, cryolite, igneous rocks, cryolite-containing granites.

Введение

Зашихинское тантал-ниобиевое редкометалльное месторождение находится в Восточном Саяне в Нижнеудинском районе Иркутской области и содержит самое большое количество тантала по отношению к ниобию среди редкометалльных месторождений России. Редкометалльные щелочные граниты обогащены тяжелыми редкоземельными элементами иттриевой группы (Машковцев и др., 2011; Бескин, 2014; Алымова, 2016; Алымова, Владыкин, 2018). Массив редкоме-

талльных гранитов приурочен к позднепалеозойской Восточно-Саянской зоне редкометалльного щелочно-гранитного магматизма. Более подробное описание геологического местонахождения месторождения и его особенностей, а также его возраста представлено в работе (Алымова, Владыкин, 2018). Выделяется несколько гипотез образования пород и ассоциирующих с ними оруденений Зашихинского месторождения: метасоматическое (Архангельская, Шурига, 1997; и др.) и магматическое (Алымова, Владыкин, 2018; Kostitsyn, Altukhov, 2004; Vladykin et al., 2016; и др.). В работе (Алымова, Владыкин, 2018) граниты разделяют на три фациальные группы: 1) амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые с порфиоровыми выделениями горошковидного кварца и кристаллами арфведсонита; 2) лейкократовые кварц-альбит-микроклиновые граниты с горошковидным кварцем; 3) лейкократовые кварц-альбитовые граниты, переходящие в альбититы с наибольшим содержанием рудных компонентов. Геологическое строение массива и особенности нахождения криолитсодержащих гранитов представлено в работе (Алымова, Владыкин, 2018) и в диссертационной работе (Русак, 2024).

Многие исследователи относят криолит к аксессуарным минералам. Целью нашей работы являлось выделение представительных образцов редкометалльных гранитов Зашихинского месторождения с криолитом, предоставленных музеем ВИМС, выделение типичных парагенезисов пород, проведение оценки взаимоотношений криолита, породообразующих и рудных минералов в граните и сопоставление их с полученными результатами экспериментов в модельной гранитной системе Si-Al-Na-K-Li-F-O-H (Шекина и др., 2020; Русак, 2024; Русак и др., 2025). Представлялось важным оценить место криолита при образовании пород и его роль в формировании связанного с ними редкометалльного оруденения. В связи с поставленными целями решались следующие задачи: 1) изготовление прозрачно полированных шлифов из редкометалльных гранитов Зашихинского месторождения; 2) минералого-петрографическое описание пород; 3) сопоставление полученных данных с работами предшественников и с нашими экспериментальными данными; 4) отнесение процесса формирования криолитсодержащих гранитов и сопутствующего редкометалльного оруденения к магматическому или метасоматическому этапу.

Методика работы

Представительные образцы редкометалльных криолитсодержащих гранитов (рис. 1) были переданы в отдел пробоподготовки ГЕОХИ РАН.

Было изготовлено 5 прозрачно-полированных петрографических шлифов с толщиной 30–40 мкм (рис. 1). Исследование шлифов проводилось на оптических микроскопах Olympus BX 51 с программным обеспечением ISCapture, а также на Nikon Eclipse LV100N Pol в лаборатории геохимии мантии Земли ГЕОХИ РАН и на Leica DM750P в ИГЕМ РАН в лаборатории петрографии



Рис. 1. Образцы редкометалльных гранитов Зашихинского месторождения из музея ВИМС: а) лейкократовый гранит с горошковидным кварцем, альбитом и криолитом; б) лейкократовый гранит с альбитом, горошковидным кварцем и колумбитом; в) лейкократовый гранит с альбитом, горошковидным кварцем и колумбитом, пироксеном, ториянитом; г) срез порфиорового гранита с горошковидным кварцем; д) общий вид порфиорового гранита с горошковидным кварцем

Fig. 1. Samples of rare-metal granites of the Zashikhinsky deposit from the VIMS museum: a) leucocratic granite with pea-shaped quartz and cryolite; b) leucocratic granite with pea-shaped quartz and columbite; c) leucocratic granite with pea-shaped quartz and columbite, pyrochlore, thorianite; d) section of porphyry granite with pea-shaped quartz; e) general view of porphyry granite with pea-shaped quartz

им. акад. А. Н. Заварицкого. В дальнейшем шлифы были переданы на напыление для изучения их морфологии и минералого-геохимического состава фаз на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-IT500 (Jeol, Япония) с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max^N (Oxford Instrument Ltd., Великобритания) на кафедру петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Эксперименты в модельной гранитной системе Si-Al-Na-K-Li-F-O-H были проведены в платиновых ампулах на УВД 10000 в ИЭМ РАН при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1\text{ кбар}$. На протяжении трех суток температура в реакторе поддерживалась $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 1 кбар, затем температуру понижали до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и поддерживали еще трое суток при том же давлении. Стартовые составы, использованные реактивы и другие детали методики работы представлены в статьях (Шекина и др., 2020; Русак и др., 2024, 2025). Стартовый состав системы отвечал гранитной эвтектике Qz-Ab-Ort при $T = 690\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 1\text{ кбар}$ H_2O при содержании 1 мас. % F (Manning, 1981) и 1.5 мас. % Li. Для насыщения этого силикатного расплава алюмофторидными фазами в исходную шихту вводили смесь солевых компонентов состава $(\text{Li,Na,K})_3\text{AlF}_6$, близкого по стехиометрии к криолиту (CrI). Редкоземельные элементы вводились определенными парами, чтобы на приборе при анализе не происходило перекрывание пиков РЗЭ: Y_2O_3 , La_2O_3 ; Sm_2O_3 , Gd_2O_3 , Tb_2O_3 ; CeO_2 , Eu_2O_3 и Ho_2O_3 ; Dy_2O_3 ; Pr_2O_3 , Lu_2O_3 , Sc_2O_3 ; Er_2O_3 , Yb_2O_3 ; Nd_2O_3 , Tm_2O_3 ; Sc_2O_3 , Gd_2O_3 .

Исследование фазового состава минералов и содержания РЗЭ проводили на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-IT500 (Jeol, Япония) с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max^N (Oxford Instrument Ltd., Великобритания) и на электронно-зондовом микроанализаторе Superprobe JXA-8230 (Jeol, Япония) в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ.

Результаты работы

Преимущественно все образцы Зашихинского месторождения представлены лейкократовыми криолитсодержащими гранитами с горошковидным кварцем и удлиненными призматическими черными кристаллами эгирина (рис. 1). Вокруг кристаллов эгирина часто наблюдаются ореолы ожелезнения. Породы имеют массивную текстуру и порфиоровую среднезернистую структуру. Рудные минералы представлены колумбитом, пироксеном, торитом, торианитом и другими. Один из образцов отличается от других наибольшим содержанием в объеме породы округлых зерен кварца, погруженных в альбит-кварц-слюдавую матрицу (рис. 1 д) (Русак, 2024).

Рассмотрим наиболее типичный пример лейкократового гранита, характерный для данного месторождения. При исследовании образцов на оптическом микроскопе был выделен основной парагенезис минералов, характерный для Зашихинского месторождения: кварц, калиевый полевой шпат, альбит, эгирин, литиевые слюды, криолит, флюорит, циркон, магнетит и др. (Русак и др., 2024). При описании прозрачно-полированных петрографических шлифов были выделены некоторые особенности: часто наблюдаемая микрографическая структура с кристаллами плагиоклаза внутри зерен кварца (рис. 2 а), сростание эгирина с кристаллами циркона (рис. 2 б), кристаллизация рудных минералов в интерстициях между зернами породообразующих минералов (рис. 2 в, г) (Русак и др., 2024).

При изучении образцов на электронном микроанализаторе удалось точно определить состав рудных минералов. На контакте с породообразующими минералами, а также с криолитом кристаллизуются колумбит, танталит, гагаринит, торит, торианит, флюорит, ксенотим, томсенит, циркон, магнетит, оксиды и гидроксиды железа (рис. 3). Породообразующие минералы (кварц, полевой шпат, альбит, полилитионит) имеют ровные границы с криолитом, не наблюдается следов замещения и влияния других факторов метасоматоза. Рудные минералы образуют изометричные ромбические и кубические формы. Размеры акцессорных кристаллов циркона не превышают 500 мкм в длину (рис. 2 г). Фосфат иттрия тяготеет к тантало-ниобатам и образует сростания ксенотима и колумбита-танталита в гранитах Зашихинского месторождения. Колумбит часто кристаллизуется на контакте с криолитом и флюоритом (рис. 3 а, б) (Русак и др., 2024). Редкометалльные грани-

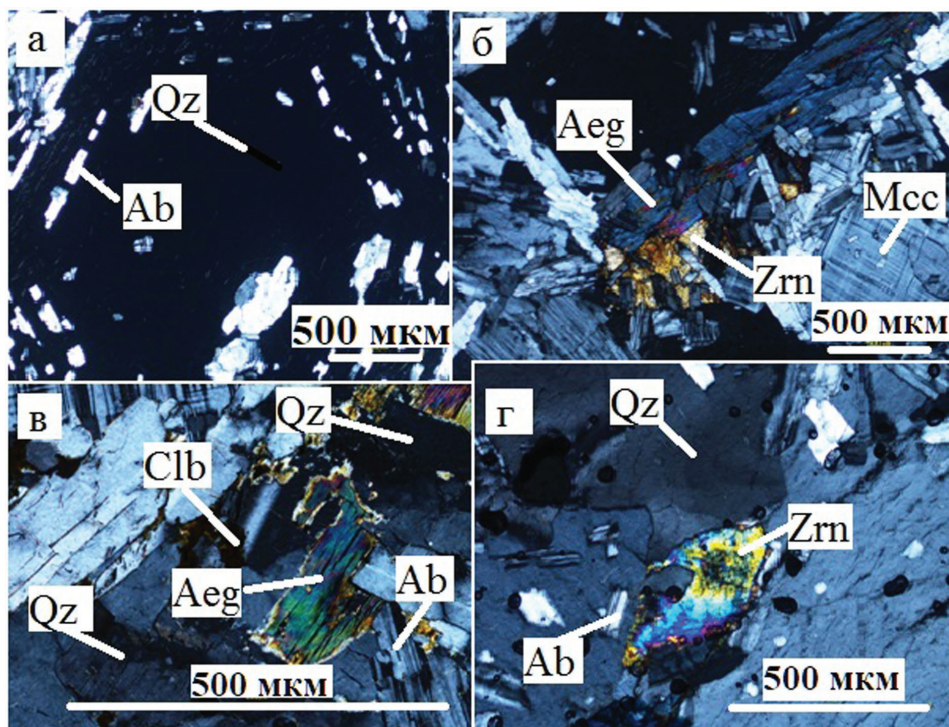


Рис. 2. Минеральные ассоциации в редкометальном граните Зашихинского месторождения: а) микрографическая структура в редкометальном граните с горошковидным кварцем; б) сростание удлиненного кристалла эгирина и циркона с высокими интерференционными окрасками в микроклин-альбит-кварцевой матрице; в) крупные кристаллы эгирина, альбита и кварца в редкометальном граните с горошковидным кварцем, в интерстициях между которыми образуется колумбит; г) кристалл циркона с высокими интерференционными окрасками между кристаллами кварца. Микрофотографии в проходящем плоскополяризованном свете, николи скрещены. Qz – кварц, Aeg – эгирин, Zrn – циркон, Mcc – микроклин, Ab – альбит, Clb – колумбит

Fig. 2. Mineral assemblages in rare-metal granite from the Zashikhinsky deposit: a) micrographic texture in rare-metal granite with pea-shaped quartz; b) intergrowth of an elongated aegirine crystal and zircon with high interference colors in a microcline-albite-quartz matrix; c) large crystals of aegirine, albite, and quartz in rare-metal granite with pea-shaped quartz, with columbite forming in the interstices between them; d) zircon crystal with high interference colors between quartz crystals. Micrographs in transmitted plane-polarized light, crossed nicols. Qz – quartz, Aeg – aegirine, Zrn – zircon, Mcc – microcline, Ab – albite, Clb – columbite

ты содержат большое количество фторсодержащих фаз: криолит, томсенолит, гагаринит (редкометалльный фторид натрия и кальция), литиевые слюды (полилитионит, циннвальдит), флюорит. По данным (Бескин, 2014) содержание фтора в альбитизированном лейкограните Зашихинского месторождения может быть до 0.3 мас. %.

В работе (Альмова, Владыкин, 2018) отмечено, что поведение породообразующих и редких элементов в лейкократовых кварц-альбитовых гранитах доказывает единый источник щелочногранитной магмы и рудного вещества, обогащенного редкими и редкоземельными элементами. Также отмечен европиевый минимум, характерный для пород, образовавшихся путем магматической дифференциации.

Ранее было показано, что при 800 °С и 1 кбар в модельной фторсодержащей гранитной системе возникает жидкостная несмесимость между алюмосиликатным и солевым расплавами (Когарко, 1967; Когарко, Кригман, 1981; Граменицкий и др., 2005; и др.). В экспериментах, проведенных нами при 600 °С и 1 кбар, сохраняется алюмосиликатный расплав, из которого кристаллизуются лейсты литиевой слюды (полилитионита) и округлые кристаллы кварца, равновесный с ним солевой щелочно-алюмофторидный расплав, в котором мы видим крупные кристаллы криолита, и остаточный расплав, накапливающий редкоземельные элементы в виде комплексов LnF_3 , NaLnF_4 и др., а также иттрий, скандий и литий (рис. 4). Литиевая слюда часто образуется на контакте двух несмешивающихся расплавов. Криолит образует округлые, иногда изометричные кристаллы до 150 мкм

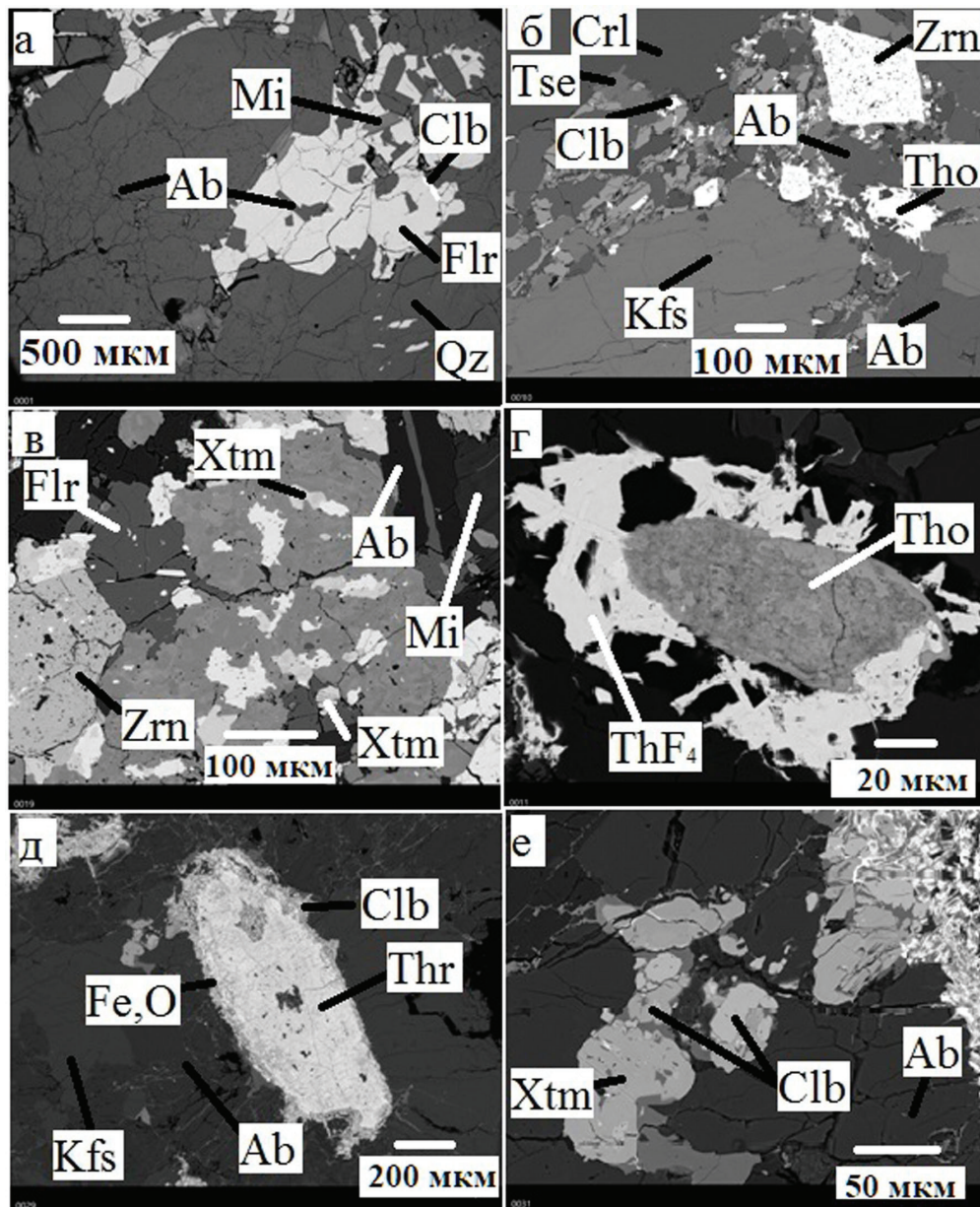


Рис. 3. Типичные парагенезисы криолитсодержащих гранитов Зашихинского месторождения: а) сростания породообразующих минералов (кварц, альбит, слюда) с флюоритом и игольчатым кристаллом колумбита; б) криолит, кристаллизующийся совместно с породообразующими (альбит, калиевый полевой шпат), рудными (колумбитом и ториянитом), и акцессорными (циркон) минералами; в) сростание ксенотима и тантало-ниобатов (колумбита-танталита) с флюоритом и цирконом среди породообразующих минералов; г) деталь-ный фрагмент изображения 3 б, округлый кристалл ториянита с оторочкой из соединения ThF_4 ; д) округлый кристалл торита, найденный в крупном кристалле альбита, с оторочкой из оксидов и гидроксидов железа, в которых находятся кристаллы колумбита; е) сростания ксенотима и колумбита в альбите. BSE-изображения. Qz – кварц, Ab – альбит, Mi – слюда, Flr – флюорит, Clb – колумбит, Crl – криолит, Kfs – калиевый полевой шпат, Tho – ториянит, Zrn – циркон, Xtm – ксенотим, Thr – торит, Fe_2O_3 – оксиды и гидроксиды железа

Fig. 3. Typical parageneses of cryolite-bearing granites of the Zashikhinsky deposit: a) intergrowths of rock-forming minerals (quartz, albite, mica) with fluorite and an acicular crystal of columbite; b) cryolite crystallizing together with rock-forming (albite, potassium feldspar), ore (columbite and thorianite), and accessory (zircon) minerals; c) intergrowth of xenotime and tantalum-niobates (columbite-tantalite) with fluorite and zircon among rock-forming minerals; d) detailed fragment of image 3b, a rounded crystal of thorianite with a rim of the compound ThF_4 ; e) a rounded crystal of thorite found in a large crystal of albite, with a rim of iron oxides and hydroxides, in which columbite crystals are located; e) intergrowths of xenotime and columbite in albite. BSE images.

Qz – quartz, Ab – albite, Mi – mica, Flr – fluorite, Clb – columbite, Crl – cryolite, Kfs – potassium feldspar, Tho – thorianite, Zrn – zircon, Xtm – xenotime, Thr – thorite, Fe_2O_3 – iron oxides and hydroxides

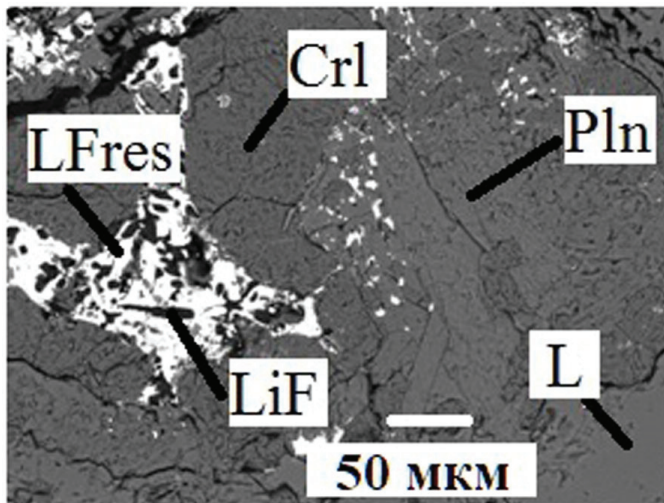


Рис. 4. Кристаллы криолита и грайсита (LiF), формирующиеся из остаточного солевого расплава (LFres) и лейсты полилиитионита (Pln), образующиеся из силикатного расплава (L). Параметры эксперимента: $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 1\text{ кбар}$. BSE-изображение

Fig. 4. Crystals of cryolite and griceite (LiF) formed from residual salt melt (LFres) and laths of polyliithionite (Pln) formed from silicate melt (L). Experimental parameters: $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $P = 1\text{ кбар}$. BSE image

(Русак и др., 2025). При сравнении изученных пород, содержащих криолит, и образцов полученных экспериментально, можно сделать вывод, что криолит мог образоваться из расплава примерно при $600\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Русак и др., 2024, 2025), что доказывает магматическую природу криолита из пород Зашихинского месторождения. Породы в дальнейшем подвергались процессам метасоматоза.

Используя литературные данные работ (Граменицкий и др., 2005; Щекина и др., 2013; Донская и др., 2018) на диаграмму TAS были нанесены точки составов экспериментальных стекол (L), равновесных с солевым расплавом (LF) и точки составов редкометалльных гранитов месторождений мира (Улуг-Танзекское, Катугинское, Зашихинское, Мадейра (Бразилия), Ивигтут и др.) (рис. 5). Точки составов гранитов Зашихинского месторождения, выделенные коричневым цветом на диаграмме TAS, находятся в области щелочных и умеренно-щелочных лейкогранитов (рис. 5 б) (Русак, 2024; Русак и др., 2025). Если сопоставить их с составами, полученными в экспериментах, то мы видим, что они попадают примерно в те же области диаграммы TAS. Коэффициенты апаитности пород и составов экспериментальных стекол в среднем близки к 1 (Русак, 2024; Русак и др., 2025).

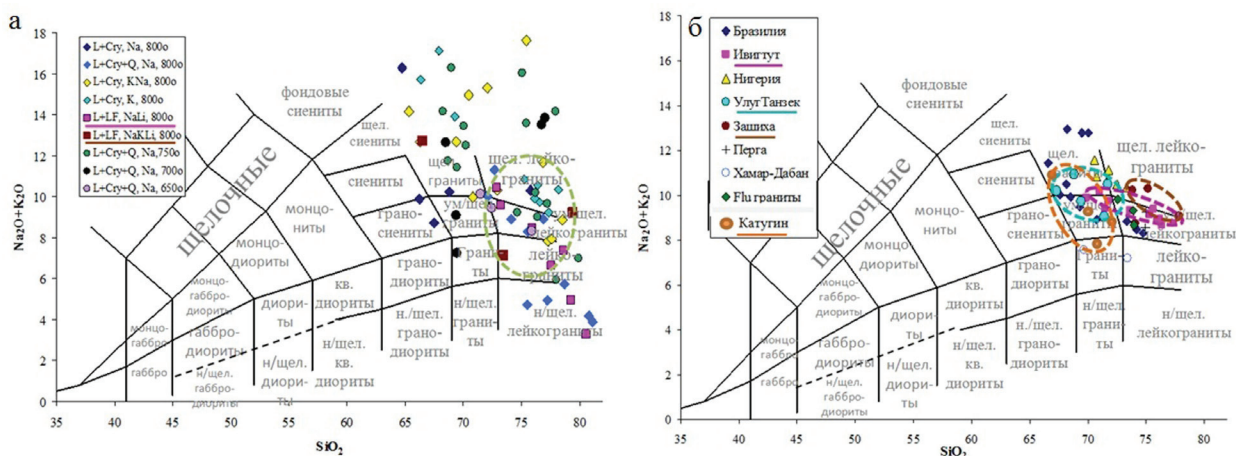


Рис. 5. а) Составы экспериментальных стекол, равновесных с криолитом и алюмофторидным солевым расплавом LF, в Na-Li и Na-K-Li частях системы при $650\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 1 кбар на диаграмме TAS; б) составы криолитсодержащих гранитов для различных месторождений мира на диаграмме TAS (Граменицкий и др., 2005; Щекина и др., 2013; Донская и др., 2018; Русак, 2024; Русак и др., 2025)

Fig. 5. a) Compositions of experimental glasses in equilibrium with cryolite and aluminofluoride salt melt LF, in the Na-Li and Na-K-Li parts of the system at $650\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 1 kbar on the TAS diagram; b) compositions of cryolite-containing granites for various deposits of the world on the TAS diagram (Gramenitskiy et al., 2005; Shchekina et al., 2013; Donskaya et al., 2018; Rusak, 2024; Rusak et al., 2025)

Выводы

Таким образом, сравнивая петрохимические составы природных криолитсодержащих гранитов Зашихинского месторождения и экспериментально полученных ликвидационных силикатно-солевых расплавов, можно объяснить формирование криолита на данном месторождении. В криолитсодержащих гранитах не обнаружено метасоматической зональности и замещения минеральных фаз. Литературные данные последних лет указывают на магматическую природу изучаемых пород (Алымова, Владыкин, 2018; и др.), а именно на единый источник щелочно-гранитных магм и рудного вещества, обогащенного редкоземельными элементами. Это подтверждается наличием европиевого минимума, характерного для пород, образовавшихся путем магматической дифференциации. В результате петролого-геохимического изучения редкометалльных гранитов можно сделать заключение о значительном накоплении ими рудных и редкоземельных элементов, а именно, тантала, ниобия, циркония, гафния, лития, редкоземельных элементов и других на поздних стадиях дифференциации обогащенных фтором и литием гранитов. Данные граниты можно отнести к редкометалльным гранитам А-типа. Сопоставление изученных парагенезисов гранитов Зашихинского месторождения с данными экспериментов позволяет сделать вывод о том, что криолит является породообразующим минералом, кристаллизующимся из солевого расплава в диапазоне температур ~ 600–700 °С и при давлении 1 кбар, а фтор и литий, содержащиеся в солевом расплаве, могли играть большую роль в процессе накопления редких элементов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского и Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Литература

1. Алымова Н. В. Металлогеническая специализация и рудоносность щелочных редкометалльных гранитов Зашихинского месторождения (Иркутская область) // Известия Сибирского отделения. Секция наук о Земле РАН. 2016. Т. 55, № 2. С. 9–20.
2. Алымова Н. В., Владыкин Н. В. Рудоносность редкометалльных гранитов Зашихинского массива (Иркутская область) и минералы-концентраты Ta, Nb, Th, Zr, TR // Известия Иркутского государственного университета. 2018. Т. 25. С. 15–29. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.15>.
3. Архангельская В. В., Шурига Т. Н. Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // Отечественная геология. 1997. № 5. С. 7–10.
4. Бескин С. М. Геология и индикаторная геохимия тантал-ниобиевых месторождений России (редкометалльные граниты) / С. М. Бескин. М. Изд-во: Научный мир, 2014. 112 с.
5. Граменицкий Е. Н., Шекина Т. И., Девятова В. Н. Фазовые отношения во фторсодержащих гранитной и нефелин-сиенитовой системах и распределение элементов между фазами (экспериментальное исследование). М. Изд-во: ГЕОС, 2005. 188 с.
6. Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Скляр Е. В., Котов А. Б., Ларин А. М., Старикова А. Е., Мазукабзов А. М., Толмачева Е. В., Великославинский С. Д. Происхождение палеопротерозойских редкометалльных гранитов Катугинского массива // Петрология. 2018. Т. 26, № 1. С. 52–71. <https://doi.org/10.7868/S086959031801003X>.
7. Когарко Л. Н. Область расслоения в расплавах системы Si, Al, Na || O, F // Доклады АН СССР. 1967. Т. 176, № 4. С. 918–920.
8. Когарко Л. Н., Кригман Л. Д. Фтор в силикатных расплавах и магмах. М. Изд-во: Наука, 1981. 126 с.
9. Машковцев Г. А., Быховский Л. З., Рогожин А. А., Темнов А. В. Перспективы рационального освоения комплексных ниобий-тантал-редкометалльных месторождений России // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 9–13.
10. Русак А. А. Фазовые отношения и распределение редких элементов между фазами в высокофтористой модельной гранитной системе Si-Al-Na-K-Li-F-O-H при высоких ТР-параметрах: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М. Изд-во: ГЕОХИ РАН. 2024. 26 с.
11. Русак А. А. Фазовые отношения и распределение редких элементов между фазами в высокофтористой модельной гранитной системе Si-Al-Na-K-Li-F-O-H при высоких ТР-параметрах: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М. Изд-во: ГЕОХИ РАН. 2024, 202 с.

12. Русак А. А., Щекина Т. И., Зиновьева Н. Г. Образование криолита в гранитах Катугинского месторождения с позиции результатов экспериментов во фтор-литийсодержащей гранитной системе // Петрология. 2025. Т. 33, № 5. С. 40–57. <https://doi.org/10.31857/S0869590325050037>.
13. Русак А. А., Щекина Т. И., Зиновьева Н. Г., Бычков А. Ю., Луканин О. А. Криолит как реперный минерал редкометалльной минерализации (экспериментальное исследование) // Геохимия. 2024. Т. 69, № 7. С. 579–595. <https://doi.org/10.31857/S0016752524070013>.
14. Щекина Т. И., Граменицкий Е. Н., Алферьева Я. О. Лейкократовые магматические расплавы с предельными концентрациями фтора: эксперимент и природные отношения // Петрология. 2013. Т. 21, № 5. С. 499–516. <https://doi.org/10.7868/s0869590313040079>.
15. Щекина Т. И., Русак А. А., Алферьева Я. О., Граменицкий Е. Н., Котельников А. Р., Зиновьева Н. Г., Бычков А. Ю., Бычкова Я. В., Хвостиков В. А. Распределение REE, Y, Sc и Li между алюмосиликатным и алюмофторидным расплавами в модельной гранитной системе в зависимости от давления и содержания воды // Геохимия. 2020. Т. 65, № 4. С. 343–361. <https://www.elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S001675252004010X>.
16. Kostitsyn Yu. A., Altukhov E. N. The Khäilama and Aryskañ massifs of alkali granitoids, Eastern Sayan: age and formation conditions by Rb-Sr isotopic and geochemical data // Geochemistry International. 2004. V. 42, No. 3. P. 195–204.
17. Manning D. The effect of Fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb // Contrib. Mineral. Petr. 1981. V. 76. P. 206–215.
18. Vladykin N. V., Alymova N. V., Perfil'ev V. V. Geochemical Features of Rare-Metal Granites of the Zashikhinsky Massif, East Sayan // Petrology. 2016. V. 24. No. 5. P. 512–525. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0869591116050052>.