

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВDOI <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1483.03>

© Д. чл. В. И. АЛЕКСЕЕВ,* п. чл. Ю. Б. МАРИН,* д. чл. О. Л. ГАЛАНКИНА**

**ВОЛЬФРАМОИКСИОЛИТ В ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫХ ГРАНИТАХ
АРГА-ЫННАХ-ХАЙСКОГО МАССИВА, ЯКУТИЯ**

* Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Санкт-Петербург, В. О., 21-я линия, 2;
e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru

** Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

В литий-фтористых гранитах и онгонитах Арга-Ыннах-Хайского массива (Восточная Якутия) впервые установлен аксессуарный комплекс вольфрамсодержащих тантало-ниобатов (колумбит-(Fe), колумбит-(Mn), танталит-(Mn), минералы группы микролита, танталсодержащий рутил), включающий «вольфрамсиолиит». Охарактеризованы породы, содержащие вольфрамсиолиит, его состав и типоморфные особенности: высокая железистость; ведущая минералообразующая роль ниобия и широкие вариации содержания вольфрама и тантала; парагенезис с вольфрамовым колумбитом-(Mn), тантало-ниобиевым ферберитом, лепидолитом и топазом. Вольфрамсиолиит Арга-Ыннах-Хайского массива образуется на позднемагматическом этапе кристаллизации Li-F гранитов путем полиморфного преобразования колумбита-(Fe). Анализ аксессуарной минерализации редкометалльных Li-F гранитов Евразии с учетом новой находки позволяет сделать вывод, что вольфрамсиолиит является типоморфным аксессуарным минералом литий-фтористых гранитов и служит индикатором редкометалльно-гранитового магматизма с сопутствующей оловянно-редкометалльной рудной минерализацией.

Ключевые слова: вольфрамсиолиит, колумбит, ферберит, литий-фтористые граниты, онгониты, Арга-Ыннах-Хайский гранитный массив, Якутия, Дальний Восток России.

V. I. ALEKSEEV,* Yu. B. MARIN,* O. L. GALANKINA**
WOLFRAMOIXIOLITE IN LITHIUM-FLUORIC GRANITES
OF THE ARGA-YNNAKH-KHAYSKY MASSIF, YAKUTIA

* Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

** Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint Petersburg, Russia

For the first time, lithium-fluoric granites and ongonites of the Arga-Ynnakh-Khaysky massif (East Yakutia) have been revealed to contain an accessory complex of tungsten-bearing tantalum-niobates (columbite-(Fe), columbite-(Mn), tantalite-(Mn), minerals of microlite group, tantalic rutile) including «wolframoixiolite». These rocks containing wolframoixiolite, their composition and typomorphic features are described: they are highly ferriferous, with major geochemical role of niobium and wide variations of tungsten and tantalum concentrations. Wolframoixiolite occurs there in paragenesis with tungsten-bearing columbite-(Mn), tantalum-niobium ferberite, lepidolite and topaz. Wolframoixiolite of the Arga-Ynnakh-Khaysky massif was formed on a late-magmatic stage of lithium-fluoric granites crystallization by polymorphic transformation of columbite-(Fe). The study of accessory mineralization in rare-metal granites of Eurasia allows, taking into account a new find, to draw a conclusion, that wolframoixiolite is typomorphic accessory mineral in lithium-fluoric granites

and may be looked as the indicator of rare-metal-granite magmatism with accompanying tin-rare-metal ore mineralization.

Key words: wolframioxiolite, columbite, ferberite, lithium-fluoric granites, ongonites, Arga-Ynnakh-Khaysky granite massif, Yakutia, Russian Far East.

Исходя из общности тектонических, магматических и металлогенических процессов на континентальных окраинах Тихого океана, академик С. С. Смирнов выделил на Востоке России Восточно-Азиатскую олово-вольфрамовую зону. Одним из признаков единства этой зоны выступает широкое распространение в дальневосточных литий-фтористых гранитах (ЛФГ) вольфрамсодержащих акцессорных минералов — ферберита, шеелита, русселита, ишикавита, колумбита и др. (Алексеев, Марин, 2014). Существенное значение в этой минеральной ассоциации имеет «вольфрамооксиолит», описанный в ЛФГ и онгонитах Северного массива на Чукотке (Алексеев и др., 2010), Лэйцзилинского, Цзянфэнлинского и Дацзишаньского массивов в Южном Китае (Zhang et al., 2003; Zhao et al., 2017; Xie et al., 2018). Отмечен вольфрамооксиолит и в редкометалльных грейзенах, сопровождающих ЛФГ, на месторождениях Тигриное в Приморье (Руб, Руб, 2006) и Полярное в Якутии (Амичба, Дубакина, 1976). В статье описана новая находка «вольфрамооксиолита» в ЛФГ и онгонитах Арга-Ыннах-Хайского массива в Восточной Якутии, входящих в состав кестерского комплекса редкометалльных гранитов.¹ Это подтверждает вольфрамоносность ЛФГ Дальнего Востока России и позволяет провести их аналогию с редкометалльными гранитами Евразии.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Арга-Ыннах-Хайский массив площадью 48 км² расположен на Янском плоскогорье в междуречье Яны и Борулаха и выражен в рельефе в виде горы Арга-Турагас (1271 м). Территория сложена средне-верхнетриасовыми флиш-идными толщами общей мощностью около 2000 м. Алевролиты, песчаники и аргиллиты смяты в крупные относительно пологие складки субмеридионального простирания, метаморфизованы по площади в условиях зеленосланцевой фации, а в экзоконтактовой зоне превращены в кордиерит-калишпат-биотитовые роговики. На территории развиты разрывные нарушения северо-восточного и северо-западного простирания, контролирующие размещение интрузий и гидротермальных образований.

Арга-Ыннах-Хайский массив относится к Эге-Хайскому поперечному магматическому ряду Верхоянского складчато-надвигового пояса, образованному в процессе коллизии Колымо-Омолонского массива и Сибирского кратона. Массив выражен в гравитационном поле Адыча-Эльгинского глыбового поднятия в виде локальной отрицательной аномалии –50 мГл. Форма тела купо-

¹ Кестерский комплекс упразднен при издании листа Q-53 Госгеолкарты 1000/3 и изъят из Верхояно-Колымской серийной легенды на том основании, что редкометалльные граниты признаны метасоматическими образованиями (Государственная..., 2016). Это противоречит фундаментальным положениям современной петрологии гранитоидов (работы Л. В. Таусона, В. И. Коваленко, М. И. Кузьмина, С. М. Бескина, В. В. Ярмолюка и др.), действующему Петрографическому кодексу (2009) и данным трех поколений геологов, изучавших Арга-Ыннах-Хайский массив, — В. К. Чайковского, Б. Л. Флёрова (1971), М. А. Романовой (1976), В. В. Бояршинова, Ю. С. Орлова (1984), В. И. Шура, С. Ф. Лугова, Ю. Д. Недосекина (1988), В. А. Труниллиной (2019) и др.

лообразная со склонением на северо-восток; площадь сечения на глубине 2 км составляет 385 км². Массивы Эге-Хайского ряда принадлежат раннемеловому бакы-дербекинскому комплексу и включают (Государственная..., 2016): 1) раннюю фазу даек диабазов и диорит-порфиринов, 2) главную фазу крупных массивов и даек биотитовых гранитов, 3) дополнительную фазу лейкогранитов, 4) жильную фазу лейкогранитов, аплитов, гранит-порфиринов.

На дневной поверхности Арга-Ыннах-Хайский массив вскрыт в виде двух выходов, разделенных небольшим (0.7—2 км) полем роговиков. Юго-западный выход массива сложен средне-крупнозернистыми андезиновыми гранитами главной фазы, переходящими в эндоконтактах в среднезернистые гранодиориты. В северо-восточном выходе преобладают порфириновидные двуслюдяные граниты дополнительной фазы. Дайки мусковит-турмалиновых лейкогранитов, аплитов и гранит-порфиринов субмеридионального и восток-северо-восточного простирания, прорывают граниты главной и дополнительной фаз массива и вмещающие ороговикованные породы.

В центральной части юго-западного выхода андезиновые граниты и субмеридиональная дайка лейкогранитов прорваны гарполитом редкометалльных ЛФГ площадью около 1 км², падающим на северо-запад под углами 15—80°. Форма гарполита контролируется разрывными нарушениями северо-западного и северо-восточного простирания, вследствие чего интрузия дугообразно изогнута в плане. Пологие контакты гарполита осложнены апофизами в андезиновых гранитах, микроклиновыми штокшайдерами мощностью 0.25—0.5 м, линзами грейзенов. Гарполит и десятки даек ЛФГ, расположенных к северо-востоку от него, образуют кестерский комплекс редкометалльных гранитов. Простирание даек северо-восточное и северо-западное, мощность 0.2—10 м, протяженность десятки метров. В состав комплекса включены также дайки и жилы онгонитов мощностью 0.7—2 м, которые, по одним данным, срезаются апофизами гарполита ЛФГ (Флёров и др., 1971; Недосекин, 1988), а по другим — прорывают дайки ЛФГ (Орлов и др., 1984; Трунилина и др., 2019).

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫХ ГРАНИТОВ И ОНГОНИТОВ

Литий-фтористые граниты Арга-Ыннах-Хайского массива представляют собой белые сахаровидные породы с массивной либо шпировой текстурой. Минеральный состав (об. %): альбит № 2—7 (28—41), микроклин (13—29), кварц (23—41), светлая слюда (8—13), топаз (0.5—3), монтебразит (0.1—3). По данным Ю. С. Орлова и соавторов (1984), с глубиной лепидолит-амблигонит-альбитовые граниты сменяются мусковит-альбитовыми. Мы выделяем по результатам разведочного бурения эндоконтактовую фацию (0—60 м) монтебразит-лепидолитовых и лепидолитовых ЛФГ и глубинную (60—150 м) фацию топаз-лепидолитовых ЛФГ. В зоне перехода монтебразитовых разновидностей в топазовые расположены линзы редкометалльных альбититов.

Структура ЛФГ равнозернистая, от крупно- до мелкозернистой; в дайковых породах — порфирировая. Характерна ведущая роль практически чистого альбита, представленного двумя генерациями. Относительно крупный альбит первой генерации имеет удлинение 1:3—1:6 и образует каркас породы; мелкий лейстовый альбит второй генерации (1:5—1:12) заполняет интерстиции каркаса или образует пойкилитовые вростки в микроклине и кварце. Ми-

кроклин с обилием пертитов характеризуется ксеноморфизмом. Кварц имеет изометричные очертания: в крупнозернистых ЛФГ он гипидиоморфный дипирамидальный, в мелкозернистых — округлый до гороховидного. В кварце отмечены зонально распределенные ориентированные включения альбита, лепидолита, монтебразита, создающие элементы структуры «снежного кома». Светлая слюда представлена плохо ограненными пластинчатыми кристаллами железистого лепидолита с вростками и каймами более позднего фенгита. Топаз образует бочонковидные и округлые кристаллы, ассоциирующие с кварцем, альбитом и монтебразитом. Встречаются включения топаза в относительно более крупном монтебразите и его графические сростки с кварцем.

Путем расчета марковских цепей межзерновых контактов микроклина, кварца и альбита на базе «модели идеального гранита» А. Б. Вистелиуса установлено, что кристаллизация ЛФГ происходила в гомогенной среде одновременно во всем пространстве гарполита, и сделан вывод о магматической природе структуры ЛФГ, нарушенной в прикровельной части гарполита вследствие наложенной альбитизации и грейзенизации (Романова, 1976). В целом структура микроклин-альбитовых гранитов кестерского комплекса полностью соответствует типовой структуре ЛФГ, описанной для многочисленных редкометалльно-гранитовых комплексов Европы и Азии.

Онгониты — светло-серые, желтовато-серые афанитовые породы с мелкими (0.5—1 мм) вкрапленниками кварца, микроклина, альбита, топаза и турмалина. От ЛФГ отличаются повышенным содержанием кварца, топаза и монтебразита. Вкрапленники кварца (1—10 об.%) имеют зонально-пойкилитовую структуру «снежного кома» и образуют цепочечные и гломеропорфировые сегрегации. Турмалин во вкрапленниках представлен скелетными кристаллами полихромного литиевого шерла. Кварц-полевошпатовая основная масса содержит литиевый фенгит, лепидолит, топаз, монтебразит. Структура матрикса фельзитовая или микрогипидиоморфная (<0.1 мм), характеризуется сочетанием лейстового альбита и изометрических зерен других минералов. Наличие линз и полос различной зернистости в сочетании с неоднородным распределением вкрапленников определяет полосчатую текстуру онгонитов.

По химическому составу ЛФГ и онгониты Арга-Ыннах-Хайского массива — это умеренно кислые (SiO_2 67.11—72.95 мас.%), субщелочные ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 7.27—8.84 мас. %), богатые глиноземом (Al_2O_3 14.61—17.84 мас. %) породы. Они относятся к высокофосфористому типу (P_2O_5 1.14—2.70 мас. %), обогащены фтором (0.8—2.2 мас. %) и редкими элементами — Li, Rb, Cs, Ta, Nb, Sn, W, Sb. Их геохимические особенности нашли отражение в составе акцессорной ассоциации и отдельных ее минералов. Главные из них (0.1—0.5 об. %): топаз, монтебразит, касситерит, фторapatит, колумбит-(Mn), танталит-(Mn) и др.; второстепенные (< 0.1 %): ниобиевый ферберит, вольфрамооксиолит, уран-гафниевый циркон, танталсодержащий рутил, ильменит, сподумен, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), уранинит и др. Акцессории тяготеют к выделениям лепидолита, топаза и монтебразита.

В юго-западном выходе Арга-Ыннах-Хайского массива по ЛФГ эндоконтактной зоны гарполита и по приконтактовым андезиновым гранитам интенсивно развивается грейзенизация. На участке изгиба гарполита параллельно его всяческой контактовой поверхности располагается залежь топаз-мусковит-кварцевых грейзенов с лепидолитом, турмалином и фосфатами алюминия. Рудные минералы грейзенов: касситерит, амблигонит, халькопирит, станнин, кестерит, самородный висмут, арсенопирит, вольфрамит, шеелит и др. Грейзеновая за-

лежь образует в сочетании с редкометалльными ЛФГ Кестерское редкометалльно-оловянное месторождение, входящее в состав Яно-Борулахской минералогической зоны.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования ЛФГ Арга-Ыннах-Хайского массива основаны на материалах Лаборатории математической геологии Математического института им. В. А. Стеклова, собранных М. А. Романовой и Д. Н. Ивановым под руководством А. Б. Вистелиуса в 1970—1971 гг. в процессе доразведки и эксплуатации месторождения Кестер (Романова, 1976). Коллекция включает 255 проб, в том числе ЛФГ 142, онгониты 13, биотитовые граниты 66, грейзены 28, альбититы 6. Пробы отобраны в районе Кестерского месторождения на 12 буровых профилях вкрест простирания гарполита. Пробоотбор произведен с поверхности на полигоне 0.5×1 км и из керна скважин глубиной 110—170 м.

Углубленное изучение коллекции гранитов выполнено методами математической геологии, петрографии и микрогеохимии (Романова, 1976; Алексеев, Марин, 2012; Бродская, Марин, 2016). Исследованы состав и структура ЛФГ и онгонитов, определены интервалы профилей, на которых они в наименьшей степени затронуты постмагматическими преобразованиями. Геохимическое изучение неизмененных гранитоидов в ЦКП Санкт-Петербургского горного университета (рентгенофлуоресцентная, атомно-абсорбционная спектрометрия, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой — XRF-1800, AA6300, ICPE-9000) позволило выделить ЛФГ и онгониты с повышенным содержанием Ta, Nb, Sn, W, Li, Rb, Zr, REE, Y. В прозрачно-полированных шлифах таких пород был проведен оптический и электронно-микроскопический поиск минералов-носителей редких металлов (JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200, ИГГД РАН, Санкт-Петербург). Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1.5 нА; ZAF-метод коррекции матричных эффектов.

При детальном изучении вольфрамовых и ниобиевых минералов в ЛФГ и онгонитах обнаружены микровыделения вольфрамоиксиолита, вольфрамового колумбита и ниобиевого ферберита. Их состав уточнен в ЦКП СПбГУ на микрозондовом анализаторе JXA-8230 с волновыми спектрометрами по стандартной методике. Использованные стандарты: чистые металлы (Fe, W, Sc, Hf), чистые оксиды (Sn, U, Zr), танталит (Ta), колумбит-(Mn) (Mn, Nb), рутил (Ti), диопсид (Ca). К группе иксиолита отнесены минералы с суммой содержаний $\sum(WO_3 + SnO_2 + TiO_2 + ZrO_2 + Sc_2O_3)$ более 10 мас. % (Beurlen et al., 2007). Для отличия минералов групп колумбита и иксиолита использованы стехиометрические критерии, предложенные в работе (Wise et al., 1998). Уделено внимание взаимоотношению акцессориев с породообразующими минералами, анатомии индивидов, составу и распределению в кристаллах элементов-примесей и минералов-узников (Алексеев, Марин, 2012; Бродская, Марин, 2016).

АКЦЕССОРНЫЙ ВОЛЬФРАМОИКСИОЛИТ

Минералогия Кестерского месторождения изучена за 80 лет достаточно подробно: кадастр минералов включает 130 минеральных видов и разновидностей, большая часть которых имеет постмагматическое происхождение (Флёрв, 1971; Кокунин, 2011). В составе ЛФГ описаны такие редкометалль-

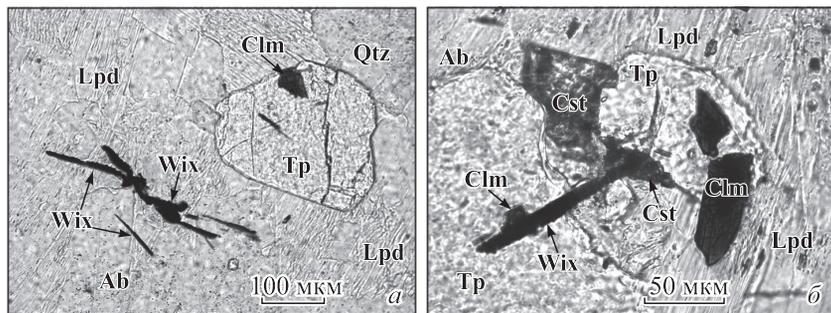


Рис. 1. Вольфрамоксиолит и вольфрамовый колумбит в литий-фтористых гранитах Арга-Ыннах-Хайского массива (проходящий свет, без анализатора).

a — включение вольфрамсодержащего колумбита-(Mn) в топазе и сложный сросток вольфрамоксиолита в лепидолите; *б* — таблитчатый колумбит-(Mn) в топазе в парагенезисе с вольфрамоксиолитом и касситеритом. Ab — альбит, Clm — колумбит-(Mn), Lpd — лепидолит, Qtz — кварц, Tp — топаз, Wix — вольфрамоксиолит.

Fig. 1. Wolframioxiolite and tungsten columbite in Li-F granites from the Arga-Ynnakh-Khaysky massif (transmitted light, without analyzer).

ные акцессории, как монтебразит, амблигонит, колумбит-танталит, сподумен, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), алланит-(Ce), циркон (Флёров и др., 1971; Орлов и др., 1984; Недосекин, 1988; Трунилина и др., 2019). Учитывая отмеченные выше геохимические особенности ЛФГ, следует предполагать в них значительно большее разнообразие акцессорных минералов и прогнозировать обнаружение новых редкометалльных минералов — индикаторов оруденения оловянно-редкометалльной формации. Проведенные исследования ЛФГ Арга-Ыннах-Хайского массива позволили установить ранее не отмеченную ассоциацию акцессорных тантало-ниобатов, содержащих вольфрам (WO_3 , мас. %): колумбит-(Fe) 1.59—7.12, колумбит-(Mn) 0—6.07, танталит-(Mn) 0—4.72, минералы группы микролита 0—3.64, танталсодержащий рутил 0—3.39².

Особого внимания заслуживают вольфрамовые акцессорные минералы. В породах Кестерского гарполита и окружающих даек нами многократно отмечен минерал, который определен по составу главных компонентов как «вольфрамоксиолит» — иксиолит, обогащенный изоморфными W, Nb и Fe (Гинзбург и др., 1969; Корнетова и др., 1982; Волошин, Пахомовский, 1988; Cerný et al., 2007; Novák et al., 2008; Алексеев и др., 2010). Все находки вольфрамоксиолита сделаны в гранитах лепидолит-топазовой фации (на глубине более 90 м), где он играет роль второстепенного акцессория и ассоциирует с вольфрамовым колумбитом. Найден вольфрамоксиолит и в онгонитах месторождения Кестер в парагенезисе с тантало-ниобиевым ферберитом.

Якутский вольфрамоксиолит, как и его аналог в ЛФГ Чукотки (Алексеев и др., 2010), наблюдается преимущественно в виде включений в топазе и светлой слюде. Минерал представлен сильно вытянутыми пластинчатыми кристаллами длиной 10—300 мкм, толщиной менее 10 мкм. Кристаллы гипидиоморфные с волнистыми гранями, по форме практически не отличаются от кристаллов колумбита. Типичны одиночные индивиды, встречаются субпараллельные и радиально-лучистые сростки (рис. 1). В проходящем свете вольфрамоксиолит непрозрачный, зерна толщиной в первые микроны слабо про-

² Минералы группы микролита найдены в районе впервые. Танталсодержащий рутил изучен в альбититах.

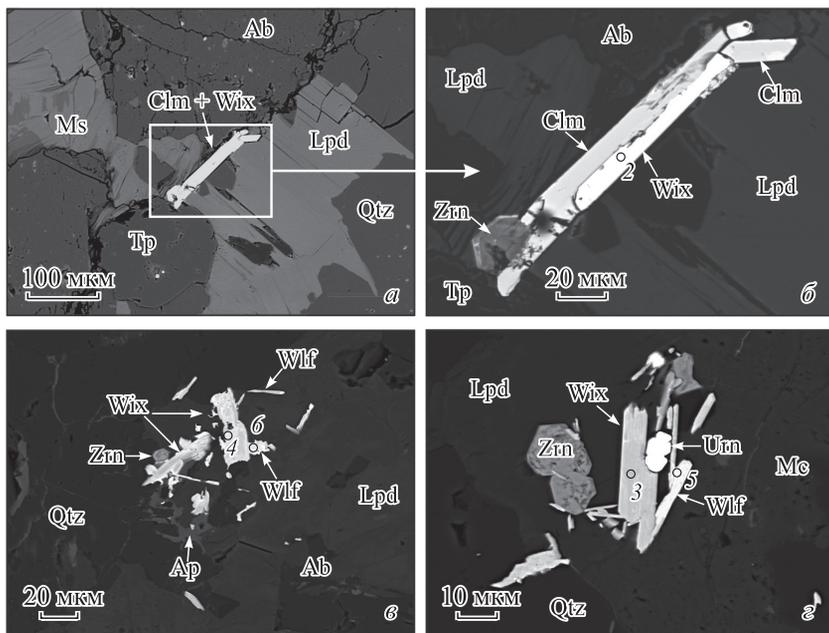


Рис. 2. Вольфрамоксиолит и тантало-ниобиевый вольфрамит в литий-фтористых гранитах и онгонитах Арга-Ыннах-Хайского массива (изображения в отраженных электронах).

a, б — параллельный сросток вольфрамоксиолита и вольфрамового колумбита в топаз-лепидолитовом граните (*б* — фрагмент рис. 2, *а*); *в* — пластинчатый вольфрамоксиолит с каймами и таблитчатыми кристаллами тантало-ниобиевого вольфрамита в онгоните; *г* — сросток вольфрамоксиолита, ниобиевого вольфрамита, гафниевого циркона и уранинита в онгоните. Ab — альбит, Clm — колумбит-(Mn), Lpd — лепидолит, Mc — микроклин, Ms — литиевый мусковит, Qtz — кварц, Tr — топаз, Wix — вольфрамоксиолит, Wlf — вольфрамит, Urn — уранинит, Zrn — циркон. Кружками показаны точки зондирования, номера точек соответствуют номерам анализов в таблице.

Fig. 2. Wolframioxiolite and tantalum-niobic wolframite in Li-F granites and ongonites from the Arga-Ynnakh-Khaysky massif (BSE images).

свечивают в красновато-коричневых тонах, погасают под углом 7—21° к границам пояса [001].

В ЛФГ вольфрамоксиолит встречается в ассоциации с вольфрамовыми тантало-ниобатами и уран-гафниевым цирконом. Особенно характерны сростки с колумбитом-(Mn) (рис. 2, *a, б*). Отмечается сонахождение вольфрамоксиолита с аксессуарным касситеритом (рис. 1, *б*). В онгонитах преобладает парагенезис с тантало-ниобиевым ферберитом, гафниевым цирконом и уранинитом. Ферберит часто образует каймы обрастания и сростки с кристаллами вольфрамоксиолита (рис. 2, *в, г*).

Электронное сканирование показало относительно устойчивый состав индивидов вольфрамоксиолита в ЛФГ. Главные компоненты минерала (мас. %): Nb₂O₅ 59.1—62.5, Ta₂O₅ 6.6—9.4, FeO 7.4—14.4, WO₃ 7.5—13.9, MnO 4.9—11.3. Характерная примесь — TiO₂ 0.9—1.8 %. Наибольшие колебания испытывают концентрации W, Fe и Mn. Mn/(Mn + Fe) изменяется от 0.24 до 0.61 (рис. 3). Эмпирическая формула минерала: (Nb_{1.09}Fe_{0.41}Mn_{0.24}W_{0.11}Ta_{0.08}Ti_{0.04})_{1.97}O_{4.00}.

Вольфрамоксиолит из онгонитов характеризуется широкими вариациями Ta, Nb, W (мас. %): Nb₂O₅ 21.4—59.2, Ta₂O₅ 10.4—29.2, FeO 6.4—15.6, WO₃ 7.8—44.0, MnO 4.2—11.5. Этот минерал содержит существенную примесь TiO₂ 1.5—3.5 %, а также примеси Sn, Ca, Sc, Zr (см. таблицу). Онгонитовый

Химический состав (мас. %) аксессуарных «вольфрамоксиолита» и ниобиевого ферберита в Li-F гранитах и онгонитах Арга-Ыннах-Хайского массива

Chemical composition (wt %) of accessory «wolframoixiolite» and niobian ferberite in Li-F granites and ongonites from the Arga-Ynnakh-Khaysky massif

Компонент	Вольфрамоксиолит в Li-F гранитах			Вольфрамоксиолит в онгонитах			Ниобиевый ферберит в онгонитах		
	1	2	Ср. (12)	3	4	Ср. (14)	5	6	Ср. (17)
CaO	—	—	—	2.06	—	0.36	0.72	—	0.15
Sc ₂ O ₃	—	—	—	—	0.71	0.10	—	—	—
TiO ₂	0.86	1.81	1.41	2.21	3.47	2.25	—	0.61	0.27
MnO	11.25	4.91	7.10	4.65	4.74	5.84	6.85	7.00	10.14
FeO*	7.38	13.77	12.17	12.39	13.37	12.73	15.80	15.34	12.69
ZrO ₂	—	—	—	3.21	—	0.46	—	—	—
Nb ₂ O ₅	59.43	62.40	60.70	41.92	30.14	42.81	4.29	8.36	2.25
SnO ₂	—	—	—	—	2.01	0.29	—	—	0.09
Ta ₂ O ₅	6.55	9.41	7.71	21.60	17.37	16.58	2.94	5.81	3.03
WO ₃	13.78	7.48	10.44	11.23	28.02	18.36	68.83	61.92	70.68
Сумма	99.25	99.78	99.53	99.27	99.82	99.78	99.43	99.06	99.30
Формульные коэффициенты катионов									
Ca	—	—	—	0.09	—	0.02	0.04	—	0.01
Sc	—	—	—	—	0.03	0.004	—	—	—
Ti	0.03	0.05	0.04	0.07	0.12	0.07	—	0.02	0.01
Mn	0.38	0.16	0.24	0.17	0.18	0.21	0.29	0.29	0.43
Fe	0.25	0.46	0.41	0.44	0.49	0.46	0.66	0.63	0.54
Zr	—	—	—	0.07	—	0.01	—	—	—
Nb	1.08	1.12	1.09	0.81	0.60	0.83	0.10	0.19	0.05
Sn	—	—	—	—	0.04	0.005	—	—	0.002
Ta	0.07	0.10	0.08	0.25	0.21	0.19	0.04	0.08	0.04
W	0.14	0.08	0.11	0.12	0.32	0.20	0.89	0.79	0.92

Примечание. Приведены представительные (1—6) и средние (Ср., в скобках — количество проб) микро-рентгеноспектральные анализы минералов (ИГГД РАН, Горный университет). Прочерк — элемент не обнаружен; FeO* — сумма FeO + Fe₂O₃. Формульные коэффициенты рассчитаны на 4 атома кислорода.

вольфрамоксиолит отличается от аналога из ЛФГ более высоким Ta/(Nb + Ta) отношением (среднее значение в ЛФГ 0.07, в онгонитах — 0.19) и железистостью Mn/(Mn+Fe) (соответственно 0.37 и 0.32). Эмпирическая формула: (Nb_{0.83}Fe_{0.46}Mn_{0.21}W_{0.20}Ta_{0.19}Ti_{0.07}Ca_{0.02}Zr_{0.01}Sn_{0.005}Sc_{0.004})_{2.00}O_{4.00}.

Вольфрамит онгонитов, ассоциирующий с вольфрамоксиолитом, отличается от него меньшей железистостью и относится к фербериту (MnWO₄ 0.29—0.42) (рис. 3). Он характеризуется существенной примесью Nb, Ta, Ti, Ca и Sn (мас. %): WO₃ 62.5—77.9, FeO 6.4—16.8, MnO 6.6—16.6, Nb₂O₅ 0—8.4, Ta₂O₅ 0—7.5, TiO₂ 0—0.6, CaO 0—0.7, SnO₂ 0—1.0 (см. таблицу). Эмпирическая формула ферберита: (Fe_{0.54}Mn_{0.43}Nb_{0.02}Ca_{0.01})_{1.00}(W_{0.92}Nb_{0.03}Ta_{0.04}Ti_{0.01}Sn_{0.002})_{1.00}O_{4.00}. В онгонитах, не содержащих вольфрамоксиолит, вольфрамит представлен гюбнеритом (MnWO₄ 0.58—0.72) и свободен от примесей Nb, Ta, Sn.

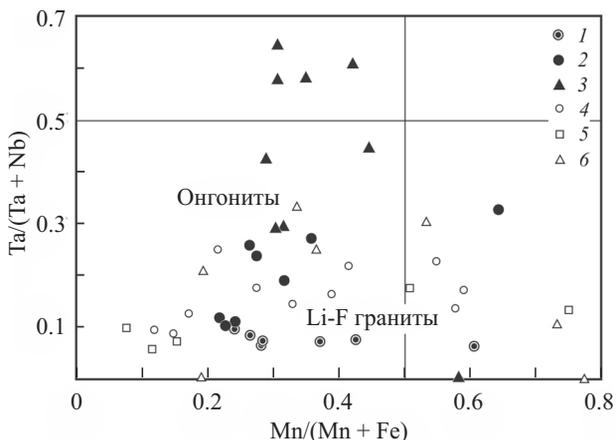


Рис. 3. Соотношение главных катионов в акцессорных вольфрамоксиолите и вольфрамите Li-F гранитов и онгонитов Арга-Ыннах-Хайского массива и других массивов мира.

1—3 — акцессорные минералы Якутии: 1 — вольфрамоксиолит Li-F гранитов, 2 — вольфрамоксиолит онгонитов, 3 — ферберит онгонитов; 4—6 — акцессорные минералы мира: вольфрамоксиолит Li-F гранитов и онгонитов (4), вольфрамоксиолит редкометалльных пегматитов (5), ферберит и гюбнерит Li-F гранитов и онгонитов (6) Дальнего Востока (Алексеев и др., 2010; Xie et al., 2018), Азии (Suwimonprecha et al., 1995; Летников, 2008), Европы (Царева и др., 1993; Johan, Johan, 1994; Raimbault, Burnol, 1998; Černý, Chapman, 2001; 2007; Aurisicchio et al., 2002; Breiter et al., 2008; Novák et al., 2008; René, 2018) и Африки (Marignac et al., 2001; Kesraoui, Nedjari, 2002; Saleh et al., 2008).

Fig. 3. Parity of the main cations of accessory wolframoixiolite and wolframite in Li-F granites and ongonites from the Arga-Ynnakh-Khaysky massif and from other massifs of the world.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

«Вольфрамоксиолит» — $(\text{Nb}, \text{W}, \text{Ta}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{O}_4$, открытый А. И. Гинзбургом (Гинзбург и др., 1969), в настоящее время не признан как минеральный вид и рассматривается как разновидность иксиолита [Updated list of IMA-approved minerals (March 2018)]. Долгое время считалось, что вольфрамоксиолит характерен лишь для редкометалльных пегматитов (Корнетова и др., 1982; Волошин, 1988; Suwimonprecha et al., 1995; Aurisicchio et al., 2002; Černý, Chapman, 2001; 2007; Novák et al., 2008; Melcher et al., 2017; и др.). Однако по мере освоения новых редкометалльных провинций количество его находок неуклонно растет, и в последние годы он многократно отмечен как акцессорный минерал ЛФГ и онгонитов в Европе, Африке и Азии (Johan, Johan, 1994; Chalal, Marignac, 1997; Raimbault, Burnol, 1998; Marignac et al., 2001; Kesraoui, Nedjari, 2002; Zhang et al., 2003; Перетяжко и др., 2007; Летников, 2008; Saleh et al., 2008; Agangi et al., 2014; Breiter et al., 2007, 2017; Melcher et al., 2017; Zhao et al., 2017; Broska, Kubis, 2018; René, 2018; Xie et al., 2018), в том числе на Дальнем Востоке России (Руб, Руб, 2006; Алексеев и др., 2010). «Лавина» находок вольфрамоксиолита косвенно подтверждает его индивидуальность как минерального вида и позволяет считать его типоморфным минералом ЛФГ (Алексеев и др., 2010).

Сравнивая граниты Дальнего Востока, содержащие вольфрамоксиолит (Руб, Руб, 2006; Алексеев и др., 2010; Алексеев, Марин, 2014), приходится признать их заметное различие по геолого-тектоническим условиям образования. ЛФГ Приамурья и Приморья сформированы в составе мезозойских аккреционных комплексов Сихотэ-Алинской складчатой системы. ЛФГ Чу-

котки возникли на активизированной неопротерозойской окраине Новосибирско-Бруксовского континента. Граниты Арга-Ыннах-Хайского массива — продукт орогенного развития Верхоянского складчато-надвигового пояса в зоне погруженной мезопротерозойской окраины Сибирского кратона. Общей чертой этих разнородных геодинамических обстановок является комплексная оловянно-вольфрамово-редкометалльная геохимическая специализация земной коры, которая отражается в составе аксессуарных комплексов гранитоидов.

ЛФГ Арга-Ыннах-Хайского массива по своим минералогическим особенностям близки к высокофосфористым редкометалльным гранитам штоков Бовуар и Монтебра в Центральном Французском массиве (Wang et al., 1992; Harlaux et al., 2015), штока Подлеси в Рудных горах Чехии (Breiter et al., 2007), массивов комплекса Са Хуин в Центральном Вьетнаме (Hien-Dinh et al., 2017). Наиболее близким аналогом якутских онгонитов с вольфрамоиксиолитом являются онгониты дайки Ришмон в массиве Блон, Франция (Raimbault, Burnol, 1998). Все эти объекты объединяет присутствие аксессуарного вольфрамоиксиолита и других тантало-ниобатов (колумбита-танталита, ниобийсодержащего рутила, урансодержащего микролита и др.) в ассоциации с касситеритом, вольфрамитом, U-Nf-цирконом и разнообразными фосфатами (амблигонитом, монтебразитом, фторапатитом, гойяцитом, триплитом, аугелитом и др.).

Вольфрамоиксиолит встречается в ЛФГ массивов Евразии в виде сростков с вольфрамитом, колумбитом или ниобийсодержащим рутилом в литиевой слюде или топазе. Не является исключением и найденный в Арга-Ыннах-Хайском массиве минерал, тесно ассоциирующий с вольфрамовым колумбитом, ниобиевым ферберитом, лепидолитом и топазом. По составу якутский вольфрамоиксиолит близок к своим аналогам из ЛФГ, онгонитов и редкометалльных пегматитов других регионов мира: преобладают железистые разновидности; лишь в 15 % проб доля Mn превышает 50 % (рис. 3). Соотношение Nb, W и Ta колеблется в широких пределах — соответственно 50—90, 5—50 и 5—25 %. Вольфрамоиксиолит из онгонитов относительно обогащен танталом и вольфрамом: $Ta/(Nb + Ta) = 0.19$, $W/(Ta + Nb) = 0.20$. Ферберит, ассоциирующий с ним, также содержит примесь тантала. Для вольфрамоиксиолита из ЛФГ характерны пониженная железистость, избыток ниобия, дефицит тантала и вольфрама: $Ta/(Nb + Ta) = 0.07$, $W/(Ta + Nb) = 0.09$ (рис. 4).

Образование вольфрамоиксиолита связано с позднемагматическим этапом кристаллизации фтористо-фосфористой гранитовой магмы, образованной под влиянием щелочных мантийных флюидов (Трунилина, 2019). Соотношение в нем главных катионов Nb, Ta, W, Fe, Mn определяется трансформацией колумбитовой структуры в вольфрамитовую (Волошин, Пахомовский, 1988; Černý, Charman, 2001; 2007; Алексеев и др., 2010). На треугольной диаграмме состава тантало-ниобатов фигуративные точки вольфрамоиксиолита, как и точки его аналогов из других районов, располагаются на линии тренда «колумбит — вольфрамит» (рис. 5). Сходство морфологии вольфрамоиксиолита и колумбита и их тесная ассоциация в якутских ЛФГ объясняются тем, что изучаемый минерал является продуктом полиморфного перехода {колумбит $FeNb_2O_6 \rightarrow$ иксиолит $3(Fe,Nb,Ta)O_2$ } путем разупорядочивания позиций катионов при изоморфном замещении Nb на Ta, W и Sn (Nickel et al., 1963) и образования кристаллической сверхструктуры (Урусов, 1987). Кристаллы «вольфрамоиксиолита» являются псевдоморфозами вольфрамсодержащего оксида ниобия по колумбиту-(Fe). Замещение минералов группы колумбита вольфрамоиксиолитом рассматривается исследователями как маркер перехода

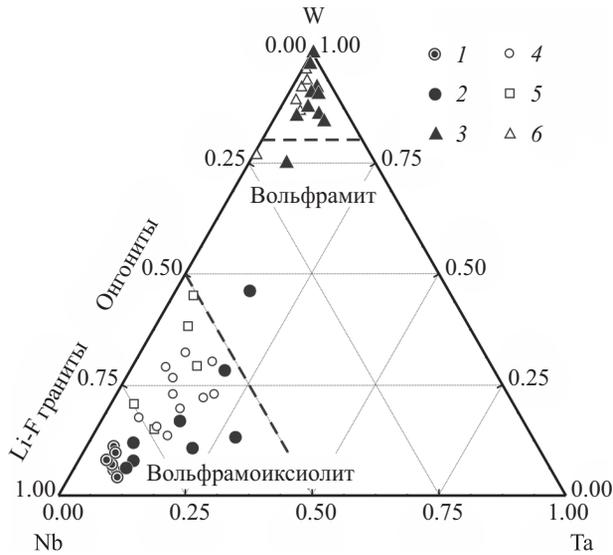


Рис. 4. Соотношение катионов Nb, W, Ta в аксессурных вольфрамоксиолите и вольфрамите из Li-F гранитов и онгонитов Арга-Ыннах-Хайского массива и других массивов мира. Усл. обозначения см. на рис. 3.

Fig. 4. Parity of cations Nb, W, Ta of accessory wolframioxiolite and wolframite in Li-F granites and ongonites from the Arga-Ynnakh-Khaysky massif and from other massifs of the world.

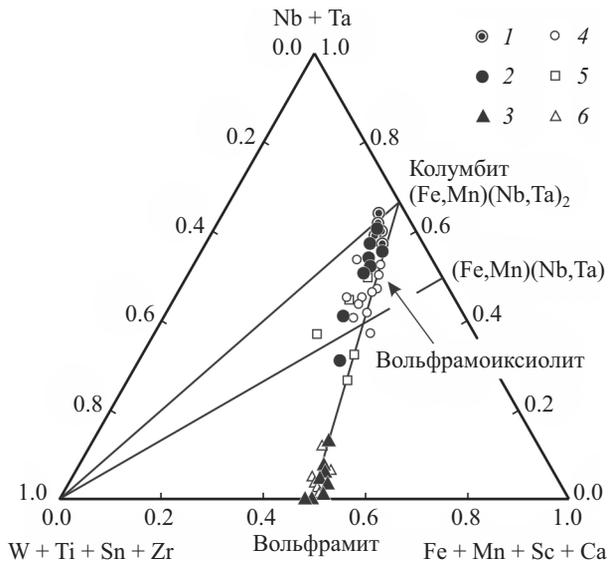


Рис. 5. Состав аксессурных вольфрамоксиолита и вольфрамота в Li-F гранитах и онгонитах Арга-Ыннах-Хайского массива и других массивов мира.

Fig. 5. Composition of accessory wolframioxiolite and wolframite in Li-F granites and ongonites from the Arga-Ynnakh-Khaysky massif and from other massifs of the world.

редкометалльных гранитов от магматического этапа кристаллизации к пневматолитовому этапу метасоматического минералообразования (Marignac et al., 2001; Breiter et al., 2017; Xie et al., 2018).

Для вольфрамово-оловянных месторождений Дальнего Востока в районах развития ЛФГ характерна редкометалльная минерализация (Амичба, Дубакина, 1976; Zhang et al., 2003; Руб, Руб, 2006; Алексеев и др., 2010, 2019; Алексеев, Марин, 2014; Zhao et al., 2018; Xie et al., 2018). Вольфрамовые тантало-ниобаты, в том числе вольфрамооксиолит, служат индикаторами комплексного оловянно-редкометалльного оруденения. Кестерское месторождение, на котором обнаружен вольфрамооксиолит, является средним месторождением олова, уже в значительной степени исчерпанным, но по прогнозным ресурсам обещает стать крупным месторождением лития, рубидия, тантала и ниобия (Государственная., 2016).

ВЫВОДЫ

1. В литий-фтористых гранитах и онгонитах Арга-Ыннах-Хайского массива впервые установлен акцессорный комплекс вольфрамсодержащих тантало-ниобатов, который включает вольфрамооксиолит, сформированный путем полиморфного преобразования колумбита-(Fe).

2. Для вольфрамооксиолита Арга-Ыннах-Хайского массива характерны: 1) высокая железистость; 2) ведущая минералообразующая роль ниобия и широкие вариации содержания вольфрама и тантала; 3) парагенезис с вольфрамовым колумбитом-(Mn), тантало-ниобиевым ферберитом, лепидолитом и топазом.

3. Анализ состава акцессорной минерализации ЛФГ Евразии позволяет сделать вывод, что вольфрамооксиолит является типоморфным акцессорным минералом литий-фтористых гранитов и служит индикатором редкометалльно-гранитового магматизма с сопутствующей оловянно-редкометалльной рудной минерализацией.

Список литературы

Алексеев В. И., Гембицкая И. М., Марин Ю. Б. Вольфрамооксиолит и ниобиевый ферберит из циннавальдитовых гранитов Чукотки // ЗРМО. **2010.** № 3. С. 72—85.

Алексеев В. И., Марин Ю. Б. Структурно-химическая неоднородность природных кристаллов и микрогеохимическое направление в онтогении минералов // ЗРМО. **2012.** № 1. С. 3—21.

Алексеев В. И., Марин Ю. Б. Вольфрамовые акцессорные минералы в литий-фтористых гранитах Дальнего Востока России // Доклады РАН. Т. 458. № 3. **2014.** С. 323—326.

Алексеев В. И., Марин Ю. Б., Гавриленко В. В. Редкометалльная минерализация оловорудных проявлений в районе развития литий-фтористых гранитов (Верхнеурмийский рудный узел, Приамурье) // Тихоокеанская геология. **2019.** Т. 38. № 2. С. 27—40.

Амичба Т. М., Дубакина Л. С. Вольфрамооксиолит в рудах оловянно-вольфрамового месторождения Якутии / Новое в минералогических исследованиях. М.: ВИМС, **1976.** С. 14—18.

Бродская Р. Л., Марин Ю. Б. Онтогенический анализ на микро- и наноуровне минеральных индивидов и агрегатов для реставрации условий рудообразования и оценки технологических свойств минерального сырья // Записки Горного института. **2016.** Т. 219. С. 369—376.

Волошин А. В., Пахомовский Я. А. Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. Л.: Наука, **1988.** 238 с.

Гинзбург А. И., Горжевская С. А., Сидоренко Г. А. Вольфрамооксиолит — разновидность оксиолита // Записки ВМО. **1969.** № 1. С. 63—73.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-53 — Верхоянск; Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, **2016.** 437 с.

Кокунин М. В. Редкие минералы забытого месторождения // Отечественная геология. **2011**. № 1. С. 72—82.

Корнетова В. А., Борисовский С. Е., Боярская Р. В., Малов В. С. О природе «вольфрамоксиолита» / Новые данные о минералах. М.: Наука, **1982**. Вып. 30. С. 117—130.

Летников Ф. А. Топазовые граниты массива Тогогуз, Северный Казахстан // Петрология. **2008**. Т. 16. № 4. С. 339—355.

Недосекин Ю. Д. Редкометалльные граниты Северо-Востока СССР. М.: Наука, **1988**. 142 с.

Орлов Ю. С., Филимонов Ю. А., Бояришинов В. В. К вопросу о генезисе аляскитов Арга-Ыннах-Хайского массива (Восточная Якутия) / Геология и полезные ископаемые Верхояно-Колымской складчатой системы. Якутск: Якутское книжное издательство, **1984**. С. 74—81.

Петряжко И. С., Загорский В. Е., Царева Е. А., Сапожников А. Н. Несмесимость фторидно-кальциевого и алюмосиликатного расплавов в онгонитах массива Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Доклады РАН. **2007**. Т. 413. № 2. С. 244—250.

Романова М. А. Марковские свойства последовательностей зерен в редкометалльных гранитах, их использование при поисковых работах и петрологических исследованиях / Геологическая информация и математическая геология. Международный геологический конгресс. XXV сессия. М.: Недра, **1976**. С. 53—65.

Руб А. К., Руб М. Г. Редкометалльные граниты Приморья. М.: ВИМС, **2006**. 86 с.

Трунилина В. А., Орлов Ю. С., Зайцев А. И., Роев С. П. Высокофосфористые литий-фтористые граниты Восточной Якутии (Верхояно-Колымская орогенная область) // Тихоокеанская геология. **2019**. Т. 38. № 1. С. 86—101.

Урусов В. С. Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд-во МГУ, **1987**. 275 с.

Флёров Б. Л., Индолев Л. Н., Яковлев Я. В., Бичус Б. Я. Геология и генезис оловорудных месторождений Якутии. М.: Наука, **1971**. 318 с.

Царева Г. М., Наумов В. Б., Коваленко В. И., Цепин А. И., Андреева И. А. Магматические касситерит, вольфрамит, колумбит и вольфрамоксиолит в камерных пегматитах Волюны (данные изучения включений в топазах) // Доклады РАН. **1993**. Т. 330. № 3. С. 366—368.

References

Agangi A., Kamenetsky V. S., Hofmann A., Prybylowicz W., Vladykin N. V. Crystallization of magmatic topaz and implications for Nb-Ta-W mineralization in F-rich silicic melts — The Ary-Bulak ongonite massif. *Lithos*. **2014**. Vol. 202. P. 317—330.

Alekseev V. I., Gembitskaya I. M., Marin Yu. B. Wolframioxiolite and niobium ferberite from zinnwaldite granites of Chukotka. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2010**. N 3. P. 72—85 (in Russian, English translation: Geol. Ore Deposits. 2011. Vol. 53. N 7. P. 639—648).

Alekseev V. I., Marin Yu. B. Structural-chemical heterogeneity of natural crystals and the micro-geochemical direction in ontogeny of minerals. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2012**. N 1. P. 3—21 (in Russian, English translation: Geol. Ore Deposits. **2012**. Vol. 54. N 8. P. 1—13).

Alekseev V. I., Marin Yu. B. Tungsten accessory minerals in lithium-fluorine granites of the Russian Far East. *Doklady Earth Sci.* **2014**. Vol. 458. N 1. P. 1161—1164 (in Russian).

Alekseev V. I., Marin Yu. B., Gavrilenko V. V. Rare-metal mineralization of Sn occurrences in the area of Li-F granites, Verkhneurmisky ore cluster, Amur Region. *Russian J. Pacific Geol.* **2019**. Vol. 13. N 2. P. 120—131 (in Russian).

Amichba T. M., Dubakina L. S. Wolframioxiolite in ore from tin—tungsten deposit in Yakutia. In: *New in mineralogical researches*. Moscow: VIMS, **1976**. P. 14—18 (in Russian).

Aurischio C., De Vito C., Ferrini V., Orlandi P. Nb and Ta oxide minerals in the Fonte del Plete granitic pegmatite dike, Island of Elba, Italy. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. N 3. P. 799—814.

Beurten H., Barreto S. B., Silva D., Wirth R., Olivier P. Titanian ixiolite-niobian rutile intergrowths from the Borborema Pegmatitic Province, northeastern Brazil. *Canad. Miner.* **2007**. Vol. 45. P. 1367—1387.

Breiter K., Škoda R., Uher P. Nb—Ta—Ti—W—Sn-oxide minerals as indicators of a peraluminous P- and F-rich granitic system evolution: Podlesí, Czech Republic. *Miner. Petrol.* **2007**. Vol. 91. P. 225—248.

Breiter K., Korbelová Z., Chládek Š., Uher P., Kněsl I., Rambousek P., Honig S., Šešulka V. Diversity of Ti-Sn-W-Nb-Ta oxide minerals in the classic granite related magmatic-hydrothermal Cínovec/Zinnwald Sn-W-Li deposit (Czech Republic). *Eur. J. Miner.* **2017**. Vol. 29. N 4(SI). P. 727—738.

Brodskaya R. L., Marin Yu. B. Ontogenetic analysis of mineral individuals and aggregates at micro- and nanolevel for the restoration of ore-forming conditions and assessment of mineral raw technological properties. *J. Mining Inst.* **2016**. Vol. 219. P. 369—376 (in Russian).

- Broska I., Kubis M. Accessory minerals and evolution of tin-bearing S-type granites in the western segment of the Gemeric Unit (Western Carpathians) // *Geologica Carpathica*. 2018. Vol. 69. Iss. 5. P. 483—497.
- Černý P., Chapman R. Exsolution and breakdown of scandian and tungstenian Nb—Ta—Ti—Fe—Mn phases in niobian rutile. *Canad. Miner.* 2001. Vol. 39. N 1. P. 93—101.
- Černý P., Novák M., Chapman R., Ferreira K. J. Subsolidus behavior of niobian rutile from the Písek region, Czech Republic: a model for exsolution in W- and Fe²⁺>>Fe³⁺-rich phases. *J. Geosci.* 2007. Vol. 52. Iss. 1—2. P. 143—159.
- Chalal Y., Marignac Ch. Découverte de wolframoixiolite dans les microgranites à albite-topaze d'Aleméda (Hoggar central, Algérie): implications métallogéniques. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*. 1997. Vol. 8. N 1. P. 71—79.
- Flerov B. L., Indolev L. N., Yakovlev Y. V., Bichus B. Y. Geology and genesis of tin ore deposits in Yakutia. Moscow: Nauka, 1971. 318 p. (in Russian).
- Ginzburg A. I., Gorzhhevskaya S. A., Sidorenko G. A. Wolframoixiolite — a variety of ixiolite. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)* 1969. Vol. 98. N 1. P. 63—73 (in Russian).
- Harlaux M., Marignac Ch., Cuney M., Mercadier J., Magott R., Mouthier B. Nb-Ti-Y-HREE-W-U oxide minerals with uncommon compositions associated with the tungsten mineralization in the Puy-Les-Vignes deposit (massif Central, France): evidence for rare-metal mobilization by late hydrothermal fluids with a peralkaline signature. *Canad. Miner.* 2015. Vol. 53. N 4. P. 653—672.
- Hien-Dinh T. T., Dao D. A., Tran T., Wahl M., Stein E., Giere R. Lithium-rich albite-topaz-lepidolite granite from Central Vietnam: a mineralogical and geochemical characterization. *Europ. J. Miner.* 2017. Vol. 29. N 1. P. 35—52.
- Johan V., Johan Z. Accessory minerals of the Cínovec (Zinnwald) granite cupola, Czech Republic. Part 1: Nb-, Ta- and Ti-bearing oxides. *Miner. Petrol.* 1994. Vol. 51. P. 323—343.
- Kesraoui M., Nedjari S. Contrasting evolution of low-P rare metal granites from two different terranes in the Hoggar area, Algeria. *J. African Earth Sci.* 2002. Vol. 34. N 3—4(SI). P. 247—257.
- Kokunin M. V. Rare minerals of the forgotten deposit. *Native Geol.* 2011. Vol. 1. P. 72—82 (in Russian).
- Kornetova V. A., Borisovsky S. E., Boyarskaya R. V., Malov V. S. About the nature of wolframoixiolite. In: *New data on minerals*. Moscow: Nauka, 1982. N 30. P. 117—130 (in Russian).
- Letnikov F. A. Topaz granites in Northern Kazakhstan. *Petrology*. 2008. Vol. 16. N 4. P. 319—334 (in Russian).
- Marignac Ch., Belkasmí M., Chalal Y., Kesraoui M. W-Nb-Ta oxides as markers of the magmatic to hydrothermal transition condition in rare-metal granites. In: *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*. Ed. by Adam Pięstrzyński et. al. Netherlands: Swets & Zeitlinger Publishers Lisse, 2001. P. 441—448.
- Melcher F., Graupner T., Gabler H. E., Sitnikova M., Oberthur T., Gerdes A., Badanina E., Chudy T. Mineralogical and chemical evolution of tantalum-(niobium-tin) mineralisation in pegmatites and granites. Part 2: Worldwide examples (excluding Africa) and an overview of global metallogenic patterns. *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 89. P. 946—987.
- Nickel E. H., Rowland J. F., McAdam R. C. Ixiolite — a columbite substructure // *American Mineralogist*. 1963. Vol. 48. P. 961—979.
- Nedosekin Yu. D. Rare-metal granites in northeast USSR. Moscow: Nauka, 1988. 142 p. (in Russian).
- Novák M., Johan Z., Skoda R., Cerny P., Srein V., Veselovsky F. Primary oxide minerals in the system WO₃—Nb₂O₅—TiO₂—Fe₂O₃—FeO and their breakdown products from the pegmatite N 3 at Dolní Bory-Hate, Czech Republic. *Europ. J. Miner.* 2008. Vol. 20. N 4. P. 487—499.
- Orlov Y. S., Filimonov Y. A., Boyarshinov V. V. Revisited on genesis of alaskaite in Arga-Ynnah-Haysky massif (East Yakutia). In: *Geology and minerals of the Verkhoyansk-Kolyma fold system*. Yakutsk, 1984. P. 74—81 (in Russian).
- Peretyazhko I. S., Zagorsky V. E., Tsareva E. A., Sapozhnikov A. N. Immiscibility of calcium fluoride and aluminosilicate melts in ongonite from the Ary—Bulak intrusion, Eastern Transbaikal Region. *Doklady Earth Sci.* 2007. Vol. 413. N 2. P. 315—320 (in Russian).
- Raimbault L., Burnol L. The Richemont rhyolite dyke, Massif Central, France: A subvolcanic equivalent of rare-metal granites. *Canad. Miner.* 1998. Vol. 36. pp. 265—282.
- René M. Nb-Ta-Ti Oxides in Topaz Granites of the Geyer Granite Stock (Erzgebirge Mts., Germany). In: *Papers 1st Int. Electronic Conf. Mineral Sci.* Basel, Switzerland, 16—31 July 2018. Basel: www.sciforum.net, 2018. P. 1—12.
- Romanova M. A. Markov properties of grains sequences in rare-metal granites, their use at prospecting works and petrological researches. In: *The Geological information and mathematical geology. The International Geological Congress. XXV session*. Moscow: Nedra, 1976. P. 53—65 (in Russian).

- Rub A. K., Rub M. G. Rare-metal granites of Primorye. Moscow: VIMS, **2006**. 86 p. (in Russian).
- Saleh G. M., El Galy M. M., Obeid M. A. Geochemical characteristics and spectrometric prospecting in the muscovite-bearing pegmatites and granites, southeastern Aswan, Egypt. *Chinese J. Geochem.* **2008**. Vol. 27. N 1. P. 9—20.
- State geological map of Russian Federation. Scale 1: 1 000 000 (the third generation). A series Verkhoyansk-Kolyma. Sheet Q-53 — Verkhoyansk; Ed. V. V. Kalashnikov. Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI, **2016**. 437 p. (in Russian).
- Suwimonprecha P., Černý P., Friedrich G. Rare metal mineralization related to granites and pegmatites, Phuket, Thailand. *Econ. Geol.* **1995**. Vol. 90. N 3. P. 603—615.
- Trunilina V. A., Orlov Yu. S., Zaitsev A. I., Roev S. P. High-phosphorous lithium-fluorine granites of eastern Yakutia (Verkhoyansk-Kolyma orogenic region). *Russian J. Pacific Geol.* **2019**. Vol. 13. N 1. P. 86—101 (in Russian).
- Tsareva G. M., Naumov V. B., Kovalenko V. I., Tsepina A. I., Andreeva I. A. Magmatic cassiterite, wolframite, columbite, and wolframoixiolite in the Volyn miarolitic pegmatites: data on inclusions in topaz. *Doklady Earth Sci.* **1993**. Vol. 330. N 3. P. 36—368 (in Russian).
- Urusov V. S. Theoretical crystal chemistry. Moscow: Moscow State University, **1987**. 275 p. (in Russian).
- Voloshin A. V., Pahomovskiy Y. A. Mineralogy of tantalum and niobium in rare-metal pegmatite. Leningrad: Nauka, 1988. 238 p. (in Russian).
- Wang R. Ch., Fontan F., Monchoux P. Minéraux disseminés comme indicateurs du caractère pegmatitique du granite de Beauvoir, Massif d'Echassières, Allier, France. *Canad. Miner.* **1992**. Vol. 30. P. 763—770.
- Wise M. A., Cerny P., Falster A. U. Scandium substitution in columbite-group minerals and ixiolite. *Canad. Miner.* **1998**. Vol. 36. P. 673—680.
- Xie L., Wang Z. J., Wang R. C., Zhu J. C., Che X. D., Gao J. F., Zhao X. Mineralogical constraints on the genesis of W-Nb-Ta mineralization in the Laiziling granite (Xianghualing district, south China). *Ore Geol. Rev.* **2018**. Vol. 95. P. 695—712.
- Zhang W. L., Hua R. M., Wang R. C. Intergrowth of wolframoixiolite and W-rich manganocolumbite in Dajishan Tungsten deposit, Jiangxi Province, South China. *Miner. Deposits.* **2003**. Vol. 22. N 2. P. 158—165.
- Zhao X., Lu J., Wang R. C. Petrographic and mineral chemical characteristics of the Jianfengling granite stock in the Nanling Range, South China: insights into the evolution of a highly evolved Li-F granitic magma. In: *Proc. 14th SGA Biennial Meeting Miner. Resources to Discover*, Quebec City, Canada, Aug 20—23, **2017**. P. 1387—1390.

Поступила в редакцию
10 февраля 2019 г.