
О ГЕНЕЗИСЕ “БЕЛЫХ ГРАНИТОВ” КЕСТЕРСКОГО ГАРПОЛИТА (АРГА-ЫННАХ-ХАЙСКИЙ МАССИВ, ВОСТОЧНАЯ ЯКУТИЯ)

© 2020 г. Д. чл. В. И. Алексеев¹, *, почетный член Ю. Б. Марин¹

¹Санкт-Петербургский горный университет, В.О., 21 линия, 2 Санкт-Петербург, 199106 Россия

*e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 20.11.2019 г.

После доработки 21.11.2019 г.

Принята к публикации 05.12.2019 г.

Рассмотрена проблема генезиса “белых гранитов” Кестерского гарполита в Арга-Ыннах-Хайском массиве Восточной Якутии. Морфология, особенности залегания и характер контактов Кестерского гарполита являются надежными признаками его магматического происхождения. Петрографические и петрохимические особенности “белых гранитов” позволяют идентифицировать их как посторогенные редкометалльные высокофосфористые граниты литий-фтористого геохимического типа. Магматический генезис структуры “белых гранитов” подтвержден методами статистического анализа. Видовой состав и типоморфные особенности, онтогенетический анализ внутреннего строения и взаимоотношений акцессорных минералов “белых гранитов” позволяют сделать вывод, что главные акцессории – касситерит, колумбит, танталит, вольфрамоксиолит, циркон, ферберит – образованы на позднемагматическом этапе эволюции низкотемпературного редкометалльного гранитового расплава в субсолидных условиях. Кестерский гарполит Арга-Ыннах-Хайского гранитного массива и генетически связанное с ним одноименное оловянно-редкометалльное месторождение входят в состав Дальневосточной суперпровинции редкометалльных гранитов.

Ключевые слова: редкометалльный высокофосфористый литий-фтористый гранит, акцессорные минералы, касситерит, колумбит-танталит, Кестерский гарполит, Якутия

DOI: 10.31857/S0869605520010049

Одним из ярких достижений российской геологии XX века стало доказательство магматического генезиса редкометалльных литий-фтористых гранитов (ЛФГ) (Коваленко, 1977; Бескин и др., 1979; 1999; Ярмолюк и др., 1987). Благодаря этому получила мощный импульс развития магматическая петрология, были открыты новые промышленные типы месторождений, по всему миру выделены провинции редкометалльно-гранитового магматизма, в том числе в Центрально-Азиатском складчатом поясе (Ярмолюк и др., 1987) и Тихоокеанском подвижном поясе (Алексеев, 2014). Проблема соотношения магматических и метасоматических процессов при образовании ЛФГ не потеряла своей актуальности до настоящего времени¹. В статье рассмотрены геологические, петрографические, петрогеохимические и минералогические особенности лепидолит-кварц-микроклин-альбитовых пород – “белых гранитов”

¹ При издании листа Q-53 Госгеолкарты 1000/3 упразднен кестерский комплекс редкометалльных литий-фтористых гранитов, признанных метасоматическими образованиями (Государственная..., 2016).

(БГ) Кестерского гарполита в Восточной Якутии, доказывающие их магматическое происхождение.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены данные по петрографии и минералогии БГ, фондовые материалы геологического картирования и поисков масштаба 1 : 50000–1 : 1000000 в пределах листа Q-53, а также разведки Кестерского месторождения. В качестве научно-методической основы расчленения и корреляции гранитоидов использована систематика редкометалльных гранитовых формаций (Бескин и др., 1979; 1999; Принципы..., 2007). Понятия “редкометалльный литий-фтористый гранит”, “онгонит” используются для обозначения гранитов особого состава и происхождения, с которыми связаны магматические и постмагматические месторождения редких металлов (Коваленко, 1977; Ярмолюк и др., 1987).

Исследования БГ Кестерского гарполита проведены с использованием эталонной коллекции гранитоидов Арга-Ыннах-Хайского массива М.А. Романовой (Лаборатория математической геологии Математического института им. В.А. Стеклова) и коллекции гранитов и руд Горного музея (Санкт-Петербургский горный университет, СПГУ); всего изучено 155 штучков. Структурно-петрографические исследования выполнены с помощью микроскопа Leica DM2500 M и аппаратно-программного комплекса для анализа изображений ВидеоТестТ на базе микроскопа Opton Axioplan Zeiss (СПГУ, более 100000 микроструктурных замеров). Результаты проанализированы с помощью методов стохастического моделирования структуры (Романова, 1976; Алексеев, 2005). Химический состав эталонных образцов гранитоидов Арга-Ыннах-Хайского массива определен в СПГУ с помощью титриметрического анализа, дополненного кулонометрией (F); полученные данные интерпретированы с использованием диаграмм (Maniag, Piccoli, 1989; Maeda, 1990). Составы минералов БГ изучены на сканирующем электронном микроскопе JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 и электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8230 (ИГГД РАН, Санкт-Петербург). Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 1.5 нА; ZAF-метод коррекции матричных эффектов. При исследовании внутреннего строения и взаимоотношений минералов БГ использована концепция онтогении минералов (Бродская, Марин, 2016; Алексеев и др., 2019).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

На Янском плоскогорье Якутии в триасовых терригенных толщах залегают массивы гранитоидов Эге-Хайского пространственного интрузивного ряда, поперечного по отношению к верхоянским складчатым структурам. В Арга-Ыннах-Хайском массиве, расположенном в междуречье Яны и Борулаха, П.П. Епифановым в 1937 г. открыто Кестерское оловянное месторождение, представляющее собой топаз-грейзеновую залежь в эндоконтакте одноименного гарполита “алясцитов”. В 1940–1970-х гг. район был охвачен поисковыми работами и детально изучен А.В. Дорофеевым и А.А. Мартыненко при разведке и эксплуатации Кестерского месторождения. В 1980–1982 гг. здесь проводилась под руководством В.В. Бояршинова средне- и крупномасштабная геологическая съемка с общими поисками, и были выявлены редкометалльные проявления. С 1990-х гг. Кестерское месторождение рассматривается как источник редких металлов – Ta, Nb, Li, Rb, Cs.

Арга-Ыннах-Хайский массив представляет собой слабо эродированное тело гранитоидов, разделенное на два купола – Западный и Восточный. Их геологическая и минералого-петрографическая характеристика приведена в ряде работ (Чайковский, 1960; Флеров и др., 1971; Коваль, 1975; Ефременко, 1976; Романова, 1976; Некрасов, 1984; Орлов и др., 1984; Недосекин, 1988; Трунилина и др., 2019; Алексеев и др., 2019).

В центре Западного купола, в андезиновых гранитах северного склона г. Арга-Турагас располагается серпообразный выход БГ длиной 2300 м и шириной до 600 м, вскрытый эксплуатационным карьером, канавами и шурфами. Разведочное бурение десятков скважин глубиной 110–170 м по профилям вкрест простирания выхода показало, что БГ слагают изогнутое по простиранию линзообразное тело, погружающееся на запад – Кестерский гарполит. Висячий контакт в южной части гарполита падает на юго-запад под углами 30°–40°, в северной части – на северо-запад под углами 15°–20°. Лежащий контакт погружается согласно с висячим в западных румбах под углами 25°–80° (рис. 1).

БГ Кестерского гарполита известны под названиями “аляскиты”, “апограниты”, “литий-фтористые граниты”, “литий-фтористые альбитофиры”, “метасоматические топаз-альбит-кварцевые породы”. Контакты БГ с вмещающими андезиновыми гранитами резкие прямолинейные (рис. 2, б) с приконтактовыми изменениями: граниты перекристаллизованы и грейзенизированы, а в БГ наблюдаются плитообразные ксенолиты гранитов. В эндоконтактах БГ более мелкозернистые и слабо порфирированные с относительно крупными вкрапленниками кварца. Пологие интервалы висячей контактовой поверхности гарполита осложнены апофизами северо–северо-восточного простирания в андезиновые граниты. В висячем эндоконтакте БГ наблюдаются штокшайдеры мощностью 0.25–0.5 м – краевые друзовидные пегматоиды, сложенные микроклином, светлой слюдой и кварцем. Менее мощные штокшайдеры установлены в зальбандах апофиз и вдоль контактов с ксенолитами гранитов. В приконтактовых гранитах отмечены кварц-микроклиновые пегматоидные шпильеры размером до 0.4 м.

В западной эндоконтактовой зоне гарполита БГ, на участке его изгиба, локализована залежь топаз-слюдисто-кварцевых грейзенов с касситеритом, образующих Кестерское оловянное месторождение. Залегание грейзенов, согласно с кровлей гарполита, и постепенный переход от БГ к метасоматитам определяют своеобразный структурно-морфологический тип месторождения – нечто среднее между минерализованным куполом и минерализованной дайкой. На поверхности с удалением от изгиба гарполита к северо-востоку и юго-востоку, а также в лежащем контакте гарполита интенсивность грейзенизации существенно уменьшается. Во вмещающих гранитах на участке изгиба гарполита наблюдается трубообразное тело флюидно-эксплозивных брекчий, в составе которых выделены ранняя магматическая брекчия из крупных обломков андезиновых гранитов и гранодиоритов, сцементированных БГ, и поздняя брекчия гранитоидов с грейзеново-турмалинитовым цементом (рис. 1).

Наряду с описываемым гарполитом в Западном куполе и его восточной экзоконтактовой зоне наблюдаются десятки даек БГ мощностью 0.2–10 м северо-западного и северо-восточного простирания, образующих полосу длиной 6 км. Вблизи гарполита локализованы дайки онгонитов мощностью 0.7–2 м (рис. 1). Дайки БГ имеют интрузивные контакты с гранодиоритами и андезиновыми гранитами, нередко сопровождаемые штокшайдерами и магматическими брекчиями, состоящими из обломков вмещающих гранодиоритов, гранитов и роговиков, сцементированных БГ.

В Арга-Ыннах-Хайском массиве установлено, помимо Кестерского месторождения, множество пунктов редкометальной и оловянной минерализации в виде кварцевых жил, зон метасоматоза и россыпей касситерита по руслам р. Турагас, ручьев Илин-Салаа и Агатогого. В северо-восточном экзоконтакте выявлены дайки и штокообразные интрузии альбитовых гранитов, с которыми связаны рудопроявления Туманное и Ытыр-Халан (рис. 1).

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ “БЕЛЫХ ГРАНИТОВ”

БГ представляют собой сахаровидные породы с массивной или шпильерной текстурой (рис. 2, а). Минеральный состав (об. %): альбит (№ 2–7) 28–41, микроклин 13–29,

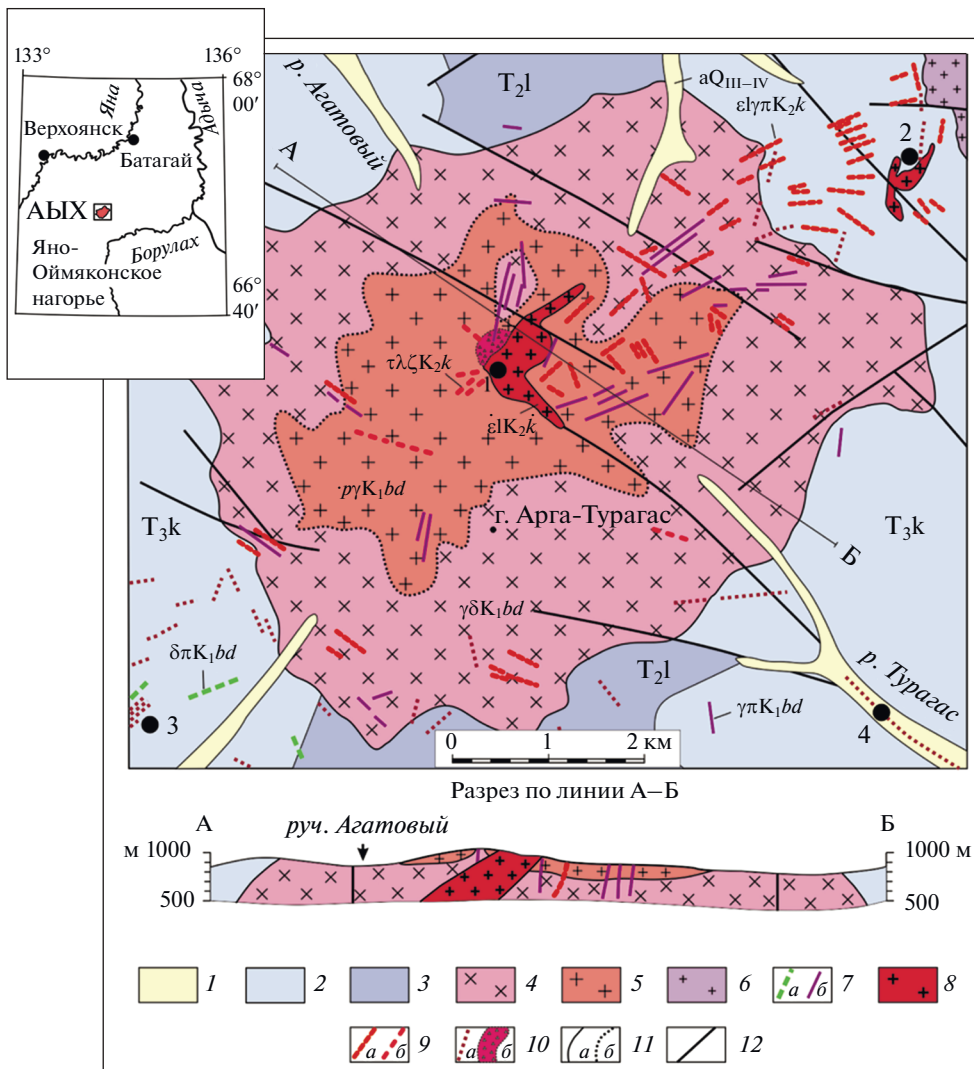


Рис. 1. Геологическая схема Западного купола Арга-Ыннах-Хайского массива (по А.В. Дорощеву, А.А. Мартыненко, 1963 г.; с учетом данных В.В. Бояршинова и др., 1980, 1998 гг.). 1 – аллювиальные и делювиально-солифлюкционные валунно-галечные отложения, дресва, пески, супеси (аQ_{III-IV}); 2 – песчаники, алевролиты карнийского яруса (Т_{3к}); 3 – алевролиты, песчаники ладинского яруса (Т_{2l}); 4–7 – баки-дербекинский комплекс: 4 – гранодиориты главной фазы (γδK_{1bd}), 5 – андезитовые граниты главной фазы (γϕK_{1bd}), 6 – биотитовые и двуслюдяные граниты и лейкограниты дополнительной фазы (γK_{1bd}), 7 – дайки диорит-порфиров (δπK_{1bd}) (а), гранит-порфиров, лейкогранит-порфиров, аплитов жильной фазы (γπK_{1bd}) (б); 8–9 – кестерский комплекс: 8 – мелко-крупнозернистые овоидофоровые БГ главной фазы (εγK_{2k}), 9 – дайки мелкозернистых БГ (εγπK_{2k}) (а), онгонитов жильной фазы (τλζK_{2k}) (б); 10 – минерализованные зоны нерасчлененные (а), флюидно-эксплозивные брекчии (б); 11 – геологические границы между разновозрастными образованиями (а) и фашиальными разновидностями (б); 12 – разрывные нарушения. Кружками показаны редкометалльные и оловорудные проявления (1 – Кестер, 2 – Туманное, 3 – Улахан-Эгелях, 4 – россыпь Турагас). На врезке показано географическое положение Арга-Ыннах-Хайского массива (АБХ).

Fig. 1. The geological map of the Western cupola of the Arga-Ynnakh-Khaysky massif (after A.V. Dorofeev, A.A. Martynenko, 1963; taking into account data of V.V. Bojarshinov et al., 1980; 1998).

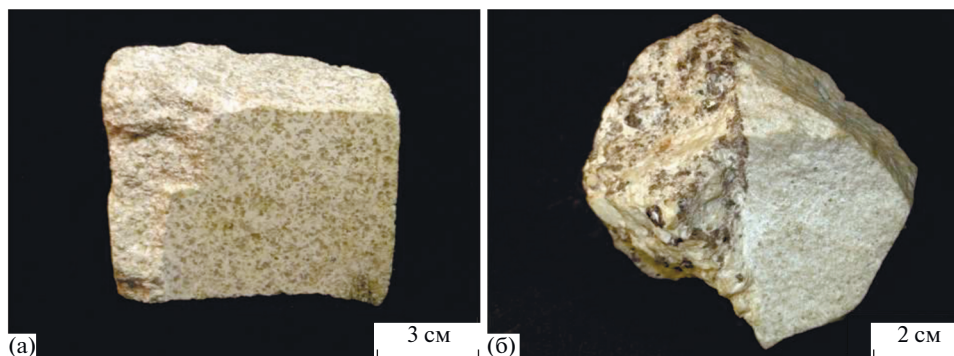


Рис. 2. “Белые граниты” Кестерского гарполита. *a* – среднезернистый “белый гранит”, восточный борт карьера Кестер; *b* – резкий прямолинейный контакт мелкозернистого лепидолитового “белого гранита” с крупнозернистым биотитовым гранитом, водораздел р. Турагас и руч. Илин-Салаа.

Fig. 2. “White granites” of the Kestersky harpolith.

кварц 23–41, светлая слюда 7–13, топаз 0.5–3, монтебразит 0.1–3. По данным разведочного бурения, в апикальной части (0–60 м) преобладают лепидолит-монтебразит-альбитовые БГ, сменяющиеся с глубиной (60–150 м) мусковит-топаз-альбитовыми разновидностями.

Структура БГ равнозернистая, от крупно- до мелкозернистой. Характерна ведущая роль альбита двух генераций. Относительно крупный толстотаблитчатый альбит 1 с удлинением 1 : 3–1 : 6 образует каркас породы; мелкий лейстовый альбит 2 (1 : 5–1 : 12) заполняет интерстиции или образует пойкилитовые вростки в микроклине и кварце. Во вкрапленниках альбита в онгонитах наблюдаются включения стекла, топаза и мелкого касситерита (Некрасов, 1984). Микроклин-пертит в БГ ксеноморфный, а кварц изометричный: в крупнозернистых агрегатах дипирамидальный, в мелкозернистых – округлый до гороховидного. В кварце встречаются зонально распределенные ориентированные включения альбита, лепидолита, монтебразита, создающие элементы структуры “снежная кома”. Светлая слюда представлена плохо ограненными пластинчатыми кристаллами железистого лепидолита с вростками и каймами более позднего фенгита.

По опубликованным данным (Недосекин, 1988; Трунилина и др., 2019), БГ – 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. Количественный химический анализ эталонных проб подтвердил такой состав гранитов. Установлены пониженные содержания MgO (0.01–0.07 мас. %), $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ (0.28–0.51 мас. %), высокая железистость [$\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 0.86–0.96], высокие содержания Li_2O (до 1.33 мас. %), P_2O_5 (до 2.04 мас. %), F (до 2.08 мас. %) (табл. 1).

Граниты Арга-Ыннах-Хайского массива относятся к плюмазитовому ряду. На дискриминационной диаграмме $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ (Maniar, Piccoli, 1989; Maeda, 1990) вмещающие андезиновые граниты попадают в поле гранитов *S*-типа и тяготеют к коллизионному геодинамическому типу. БГ отличаются от них значительно более высокой глиноземистостью: коэффициент ASI для них составляет 1.29–1.30, коэффициент агпаитности – 0.71–0.73. С глубиной и во времени (при переходе к онгонитам) агпаитность возрастает. На дискриминационной диаграмме (рис. 3) БГ занимают промежу-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) гранитов Арга-Ыннах-Хайского массива
Table 1. Chemical composition (wt %) of granite from the Arga-Ynnakh-Khaysky massif

Компонент	“Белый гранит”				Гранит	
	13	208	15	138	146	19
SiO ₂	70.09	70.55	70.16	67.23	71.17	67.96
TiO ₂	0.05	0.07	0.04	0.09	0.35	0.38
Al ₂ O ₃	16.53	16.15	16.50	16.97	15.48	15.63
Fe ₂ O ₃	0.10	0.30	0.10	0.34	0.48	1.08
FeO	0.18	0.21	0.23	0.13	1.32	1.51
MnO	0.07	0.07	0.08	0.08	0.03	0.04
MgO	0.01	0.01	0.01	0.07	0.57	0.14
CaO	0.37	0.48	0.43	0.37	1.22	2.12
Na ₂ O	4.39	4.49	4.72	5.59	3.60	3.30
K ₂ O	4.18	3.98	3.96	2.94	4.69	5.02
Li ₂ O	0.62	0.57	0.60	1.33	0.02	0.07
P ₂ O ₅	1.89	1.51	1.77	2.04	0.25	0.38
H ₂ O ⁻	0.20	0.21	0.21	0.24	0.29	0.56
F	0.44	0.60	0.58	1.08	0.07	0.10
П.п.п.	1.20	1.42	1.08	2.36	0.98	2.07
–O=F	0.19	0.25	0.24	0.45	0.03	0.04
Сумма	100.13	100.37	100.23	100.41	100.49	100.32

Примечание. 13, 208, 15 – БГ Кестерского гарполита на глубинах 0, 15, 80 м; 138 – онгонит; 146, 19 – андезиновый гранит, гранит-порфир из западного экзоконтакта гарполита.

точное положение между коллизионными гранитами S-типа и посторогенными гранитами A-типа. В.А. Трунилина с соавторами относят БГ и онгониты к плюмазитовым редкометалльным гранитам, отмечая у них такие черты внутриплитных гранитов, как высокие значения отношения Rb/Sr и содержания Nb (Трунилина и др., 2019). К внутриплитным гранитам БГ приближаются также по железистости (0.86–0.96).

С помощью компьютерного анализатора изображений ВидеоТесТ проведен корреляционный анализ минерального состава и структуры БГ. Установлено, что размеры зерен микроклина, альбита, кварца, слюды, топаза и монтебразита связаны друг с другом прямой корреляционной зависимостью: зерна минералов сопряженно увеличиваются или уменьшаются в крупно- и мелкозернистых БГ. Зафиксирована отрицательная корреляция содержаний главных минералов БГ: кварца, микроклина, альбита и лепидолита. Концентрация акцессорных минералов обратно пропорциональна содержанию щелочных полевых шпатов и слюды и прямо коррелирует с содержанием кварца. Сильно связаны между собой концентрации топаза и монтебразита (табл. 2).

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ “БЕЛЫХ ГРАНИТОВ”

Характерная для БГ Кестерского гарполита концентрация редких и летучих элементов нашла отражение в составе ассоциации акцессорных минералов. Главные из них (0.1–0.5%): топаз, монтебразит, касситерит, колумбит-(Fe), танталит-(Mn); второстепенные (<0.1%): фторапатит, циркон, вольфрамооксиолит, ферберит, стрюверит, ильменорутил, ильменит, монацит-(Ce), уранинит и др. Акцессории тяготеют к выделениям лепидолита и ассоциируют с топазом и монтебразитом (рис. 4). Монте-

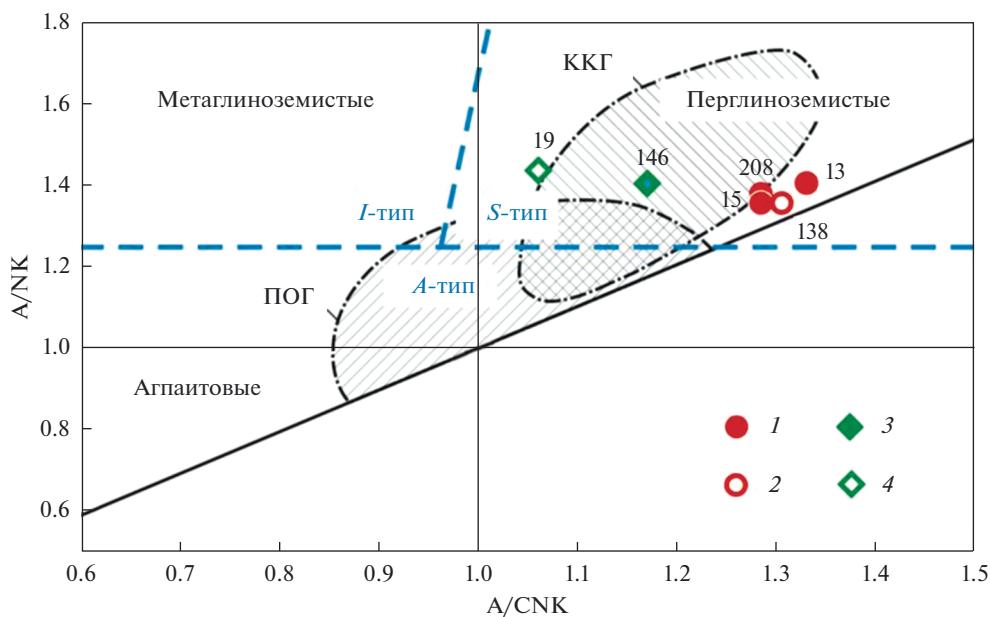


Рис. 3. Диаграмма “глиноземистость–щелочность” гранитов Арга-Ыннах-Хайского массива [$A/NK = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$, $A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$, молекулярные количества]. Сплошными линиями показаны поля петрохимических разновидностей гранитоидов, штрих-пунктиром – поля континентально-коллизийных (ККГ) и посторогенных гранитов (ПОГ) по (Maniar, Piccoli, 1989). Пунктиром показаны поля гранитов I-, S-, A-типов по (Maeda, 1990). Точки на диаграмме: кестерский комплекс: 1 – белый гранит, 2 – онгонит; бакы-дербекинский комплекс: 3 – андезиновый гранит главной фазы, 4 – гранит-порфир жильной фазы. Номера точек соответствуют номерам в табл. 1.

Fig. 3. Alkalinity index versus aluminous index diagram for granites of the Arga-Ynnakh-Khaysky massif. Dot-dash lines show boundaries of CCG and POG granites (Maniar, Piccoli, 1989), dotted lines show I-, S-, A-type granites (Maeda, 1990).

бразит равномерно рассеян в полевошпат-кварцевой матрице в виде мелких голубых зерен. Топаз представлен бочонковидными и округлыми кристаллами, образующими субагрегаты с кварцем, альбитом и монтебразитом. Встречаются включения топаза в относительно крупном монтебразите и кварце. Видовой состав аксессуарных минералов БГ заметно отличается от такового в гранодиоритах, андезиновых гранитах и лейкогранитах Арга-Ыннах-Хайского массива: в них отсутствуют титанит, алланит, флюорит, анатаз и пирротин, незначительна роль циркона, рутила и апатита. Подчеркнем редкометалльный характер минерализации БГ: преобладают минералы Li, Ta, Nb, Sn, W, Hf (Флёргов и др., 1971; Орлов и др., 1984; Кокунин, 2011; Трунилина и др., 2019).

Типоморфными особенностями касситерита являются темно-бурая или черная окраска, дипирамидальный габитус с размерами 30–770 мкм, высокое содержание Ta_2O_5 и Nb_2O_5 – в среднем соответственно 5.33 и 1.21 мас. % (табл. 3). С танталсодержащим касситеритом ассоциирует ниобий-танталсодержащий рутил, представленный стрюверитом (в среднем Ta_2O_5 12.38 мас. %, Nb_2O_5 1.39 мас. %) и ильменорутилом (Nb_2O_5 9.57 мас. %, Ta_2O_5 7.80 мас. %) (рис. 4, а, б). Циркон в БГ содержит существенные примеси HfO_2 5.69 мас. %, UO_2 2.94 мас. %; отношение Zr/Hf составляет 3.8–26.6.

Минералы группы колумбита образуют идиоморфные тонкопластинчатые кристаллы с характерной зональностью: колумбит-(Fe) окружен широкими каймами тантала-

Таблица 2. Корреляция размеров зерен и содержаний минералов в “белых гранитах” Кестерского гарполита**Table 2.** Correlation of grain size and concentration of minerals in “white granite” from the Kestersky harpolith

Размер зерен минералов								Содержание минералов						
	<i>Mc</i>	<i>Ab</i>	<i>Qtz</i>	<i>Lpd</i>	<i>Tr</i>	<i>Mnb</i>	<i>Acc</i>	<i>Mc</i>	<i>Ab</i>	<i>Qtz</i>	<i>Lpd</i>	<i>Tr</i>	<i>Mnb</i>	<i>Acc</i>
<i>Mc</i>		<u>0.52</u>	<u>0.47</u>	<u>0.39</u>	0.16	0.10	-0.17		0.01	<u>-0.52</u>	-0.14	<u>-0.19</u>	-0.03	-0.14
<i>Ab</i>	0		<u>0.66</u>	<u>0.57</u>	<u>0.21</u>	0.11	<u>-0.39</u>	<i>0.99</i>		<u>-0.70</u>	<u>-0.43</u>	-0.04	0.05	<u>-0.41</u>
<i>Qtz</i>	0	0		<u>0.49</u>	0.10	0.03	<u>-0.34</u>	0	0		0.13	<u>-0.16</u>	<u>-0.29</u>	<u>0.33</u>
<i>Lpd</i>	0	0	0		<u>0.42</u>	<u>0.45</u>	-0.12	<i>0.19</i>	0	<u>0.22</u>		<u>-0.25</u>	-0.05	-0.02
<i>Tr</i>	<i>0.20</i>	<i>0.09</i>	<i>0.42</i>	0		<u>0.41</u>	0.02	<i>0.07</i>	<i>0.68</i>	<i>0.14</i>	<i>0.02</i>		<u>0.67</u>	0.14
<i>Mnb</i>	<i>0.41</i>	<i>0.39</i>	<i>0.82</i>	0	0		-0.11	<i>0.79</i>	<i>0.65</i>	0	<i>0.67</i>	0		-0.07
<i>Acc</i>	<i>0.17</i>	0	0	<i>0.34</i>	<i>0.88</i>	<i>0.36</i>		<i>0.20</i>	0	0	<i>0.89</i>	<i>0.20</i>	<i>0.51</i>	

Примечание. Прямым шрифтом выделены коэффициенты корреляции (подчеркнуты значимые), курсивом – достигнутые уровни значимости (“0” < 0.05). Число замеров – 101088, число проб гранитов – 109. *Ab* – альбит, *Acc* – акцессории, *Lpd* – лепидолит, *Mc* – микроклин, *Mnb* – монтебразит, *Qtz* – кварц, *Tr* – топаз.

Таблица 3. Химический состав (мас. %) касситерита, колумбита и танталита в “белых гранитах” Кестерского гарполита**Table 3.** Chemical composition (wt %) of cassiterite, columbite and tantalite in “white granite” from the Kestersky harpolith

Компо- нент	Касситерит			Колумбит-(Fe)			Танталит-(Mn)		
	1	2	Ср. (144)	3	4	Ср. (25)	5	6	Ср. (43)
TiO ₂	0.28	0.26	0.07	1.83	0.85	1.40	0.73	1.26	0.81
MnO	0.11	1.50	0.04	5.28	8.13	6.93	12.31	10.25	11.00
FeO*	0.67	1.43	0.85	13.83	10.62	12.26	2.55	5.42	4.29
Nb ₂ O ₅	1.88	1.43	1.21	63.18	64.57	63.48	17.03	25.33	25.32
SnO ₂	92.93	89.42	92.47	–	–	–	–	0.79	0.55
Ta ₂ O ₅	2.36	7.56	5.33	9.42	12.85	11.35	67.21	54.01	56.39
WO ₃	–	–	–	6.13	2.15	4.21	0.30	1.80	0.88
Сумма	98.22	100.24	99.97	99.67	99.18	99.64	100.13	98.86	99.23

Коэффициенты в формуле [O=2 (касситерит), O=6 (колумбит, танталит)]

Ti	0.01	0.01	0.00	0.08	0.04	0.06	0.04	0.07	0.04
Mn	0.00	0.00	0.00	0.26	0.41	0.35	0.79	0.63	0.68
Fe	0.01	0.03	0.02	0.68	0.53	0.61	0.16	0.33	0.26
Nb	0.02	0.02	0.01	1.69	1.74	1.71	0.59	0.83	0.84
Sn	0.94	0.89	0.93					0.02	0.02
Ta	0.02	0.05	0.04	0.15	0.21	0.18	1.39	1.07	1.12
W				0.09	0.03	0.06	0.01	0.03	0.02

Примечание. Приведены представительные (1–6) и средние (Ср., в скобках – количество проб) микрорентгеноспектральные анализы минералов (ИГГД РАН, г. С.-Петербург). Прочерк – элемент не обнаружен; FeO* – сумма FeO + Fe₂O₃.

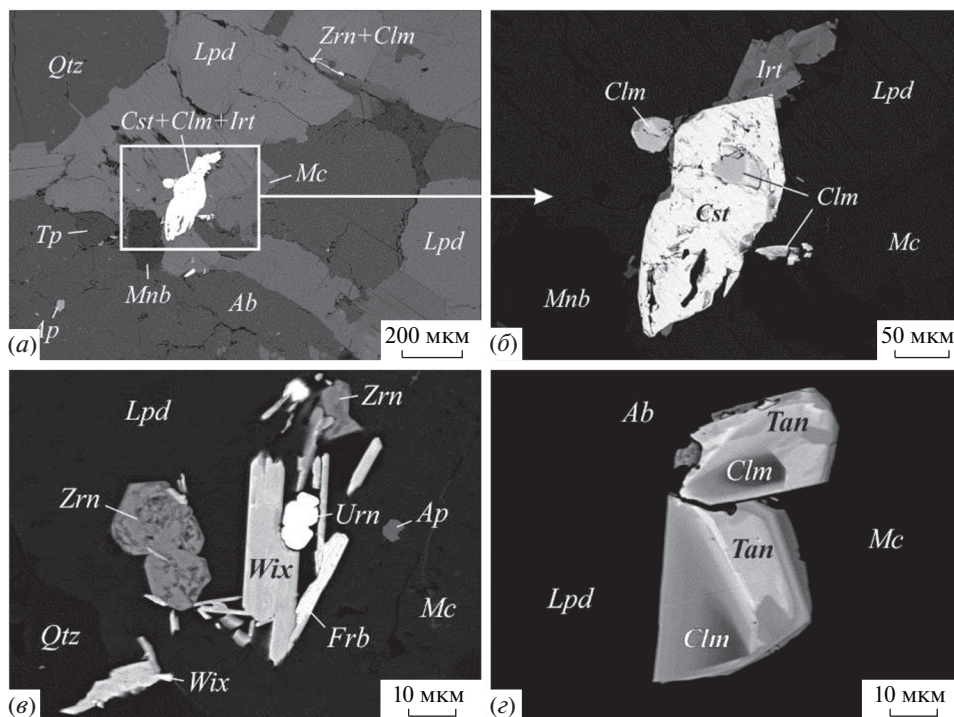


Рис. 4. Акцессорные минералы “белых гранитов” Кестерского гарполита. Изображения в отраженных электронах. *a* – среднезернистый лепидолит-микроклин-альбитовый гранит, содержащий топаз, монтебразит, фторапатит, танталовый касситерит, вольфрамосодержащий колумбит-(Fe), ильменорутил-стриюверит, гафнийсодержащий циркон; *b* – фрагмент рис. 4, *a*: касситерит с включением колумбита-танталита и каймой ильменорутила-стриюверита; *c* – сросток вольфрамоксиолита, ниобий-танталсодержащего ферберита, уран-гафнийсодержащего циркона и уранинита в онгоните; *d* – вольфрамосодержащий колумбит-(Fe) с каймой танталита-(Mn) в крупнозернистом лепидолит-микроклин-альбитовом граните. *Ab* – альбит, *Ap* – фторапатит, *Clm* – колумбит-(Fe), *Frb* – ферберит, *Irt* – ильменорутил-стриюверит, *Lpd* – лепидолит, *Mc* – микроклин, *Mnb* – монтебразит, *Qtz* – кварц, *Tan* – танталит-(Mn), *Trp* – топаз, *Wix* – вольфрамоксиолит, *Urn* – уранинит, *Zrn* – уран-гафнийсодержащий циркон.

Fig. 4. Accessory minerals of “white granite” from the Kestersky harpolith. BSE images.

та-(Mn) с увеличением отношения $Ta/(Ta + Nb)$ от ядра (в среднем 0.20) к периферии (0.69) (рис. 4, *d*). Характерны сростки колумбита-(Fe) с гафнийсодержащим цирконом, вольфрамоксиолитом и ферберитом. Колумбит-танталит чаще всего наблюдается в виде включений в топазе или лепидолите, реже в кварце, апатите, монтебразите, касситерите (рис. 4, *b*). Колумбит-(Fe) содержит в среднем: Ta_2O_5 11.35 мас. %, WO_3 4.21 мас. %, TiO_2 1.40 мас. %; танталит-(Mn) – Nb_2O_5 25.32 мас. %, WO_3 0.88 мас. %, SnO_2 0.55 мас. %, TiO_2 0.81 мас. % (табл. 3). Примесь SnO_2 характерна для ильменорутила (0.74 мас. %) и стрюверита (0.55 мас. %). В БГ нами впервые обнаружен вольфрамоксиолит (средний состав, мас. %): Nb_2O_5 60.70, Ta_2O_5 7.71, WO_3 10.44, FeO 12.17, MnO 7.10, TiO_2 1.41 (рис. 4, *c*). Минерал замещает колумбит и предшествует по времени ниобий-танталсодержащему фербериту (Nb_2O_5 2.25 мас. %, Ta_2O_5 3.03 мас. %), образуя с ним устойчивую ассоциацию (Алексеев и др., 2019).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дискуссия о происхождении Кестерского гарполита, как и многих других редкометалльно-гранитовых интрузий Евразии, развивалась вместе с идеями петрологии редкометалльных гранитов (Беус и др., 1962; Коваленко, 1977; Бескин и др., 1979; 1999; Ярмолюк и др., 1987; Руб, Руб, 2006; Петрографический..., 2009). Большинство исследователей рассматривало гарполит как самостоятельную интрузию и относило слагающие его БГ к аляскитам поздней интрузивной фазы. Наличие в апикали гарполита минерализованного купола и постепенный характер перехода от грейзенов к БГ породили популярную гипотезу о формировании кестерских БГ в результате метасоматического преобразования аляскитов. Сторонники этой точки зрения называли БГ “апогранитами” и считали магматическими минералами только микроклин, кварц 1, циркон и апатит. Все остальные компоненты апогранитов относили к постмагматическим, в том числе альбит, лепидолит, кварц 2, топаз, амблигонит, касситерит и др. (Чайковский, 1960; Флеров и др., 1971; Коваль, 1975). Со временем утвердились представления о магматическом происхождении БГ и был выделен кестерский комплекс редкометалльных гранитов (малых интрузий) (Иванов, 1969; Ефременко, 1976; Романова, 1976; Некрасов, 1984; Орлов и др., 1984; Недосекин, 1988; Алексеев, 2014; Трунилина и др., 2019).

Геологические признаки генезиса “белых гранитов”. Авторами листа Q-53 Госгеолкарты 1000/3 Кестерский гарполит БГ описан как “плащеобразная” грейзеновая залежь (Государственная..., 2016). Между тем, гипотеза метасоматического происхождения БГ входит в противоречие с такими фактами, как отсутствие метасоматической зональности “альбитизированных” и “грейзенизированных” пород; распространение “грейзенизации” на всю глубину изучения гарполита до 170 м, отсутствие на нижних горизонтах Кестерского месторождения гипотетических материнских “аляскитов”; несоразмерно слабая степень метасоматического преобразования контактирующих с БГ андезиновых гранитов.

Приведем геологические признаки магматического происхождения БГ.

1. Кестерский гарполит характеризуется структурно-морфологическими признаками интрузивного тела, прорывающего граниты и гранодиориты главной фазы Арга-Ыннах-Хайского массива (рис. 1). Наиболее информативными из них являются резкие интрузивные контакты БГ с андезиновыми гранитами (рис. 2), вдоль которых наблюдаются штокшайдеры и многочисленные ксенолиты гранитов в БГ. Контакты с вмещающими гранитоидами многократно описаны на поверхности, в карьере и многочисленных разведочных скважинах (Чайковский, 1960; Флеров и др., 1971; Ефременко, 1976; Романова, 1976; Орлов и др., 1984; Недосекин, 1988; Трунилина и др., 2019).

2. Гарполит БГ сопровождается серией малых интрузий БГ и онгонитов, образуя типичный для редкометалльных гранитов интрузивно-дайковый комплекс (Бескин и др., 1979; Ярмолюк и др., 1987; Алексеев, 2014).

3. Важным доказательством магматического генезиса Кестерского гарполита служит присутствие в его ближайшем экзоконтакте трубки взрыва, сложенной флюидно-эксплозивной брекчией с обломками гранитоидов главной фазы и цементом из БГ (рис. 1). Среди обломков брекчий, цементируемых БГ, встречаются гранит-порфиры завершающей жильной фазы бакы-дербекинское диорит-гранодиорит-гранитового комплекса, что указывает на образование БГ на позднем этапе истории магматизма и принадлежность к другому интрузивному комплексу. Следует отметить, что флюидно-эксплозивные брекчии, аналогичные кестерским, описаны и в других массивах ЛФГ: Алахинском (Алтай) (Кудрин и др., 1994), Асакан-Шумиловском и Этыкинском (Забайкалье), Одиноком (Якутия), Тигрином (Приморье) (Алексеев, 2014).

В редкометалльных гранитных расплавах, достигших малых глубин (0.5–3 км), флюидное давление может существенно возрастать по отношению к литостатической

нагрузке [до 7.5 МПа (Алексеев, 2014)]. Подобный режим сверхдавления установился на завершающем этапе формирования Кестерского гарполита БГ в его висячей экзоконтактной области. В результате глубинной эксплозии на пересечении магмоконтролирующих разрывных нарушений северо-западного и северо-восточного простирания сформировалась трубка взрыва, сложенная ранней магматической брекчией андезиновых гранитов с цементом из БГ и поздней брекчией различных гранитоидов с грейзеново-турмалинитовым цементом. В этих условиях возникли эндоконтактные рудоносные грейзены в прикровельной части гарполита БГ, образовавшие Кестерское редкометалльно-оловянное месторождение.

Петрологические признаки генезиса “белых гранитов”. Надежными признаками магматического генезиса БГ Кестерского гарполита являются их петрографические особенности. Минеральный состав и структура БГ соответствуют параметрам ЛФГ, описанным в многочисленных редкометалльно-гранитовых комплексах Забайкалья, Приморья, Монголии, Франции, Чехии, Германии, Египта, Китая (Коваленко, 1977; Бескин и др., 1979; 1999; Ярмолюк и др., 1987; Cunej et al., 1992; Huang et al., 2002; Руб, Руб, 2006; Алексеев, 2014; Breiter et al., 2017; Emam et al., 2018; Xie et al., 2018; René, 2019; и др.). Для БГ характерна “овоидофирующая” структура редкометалльных плюмазитовых гранитов с элементами структуры “снежного кома”. Косвенным свидетельством магматической природы БГ служит наличие включений стекла в альбите онгонитов, которые образуют с БГ единый магматический комплекс (Некрасов, 1984).

В соответствии с действующими петрохимическими и геохимическими классификациями БГ и онгониты Арга-Ыннах-Хайского массива представляют собой посторогенные умереннощелочные плутонические породы – плюмазитовые редкометалльные граниты литий-фтористого геохимического типа (Коваленко, 1977; Бескин и др., 1979; 1999; Ярмолюк и др., 1987; Maniar, Piccoli, 1989; Maeda, 1990; Петрографический..., 2009; Трунилина и др., 2019) (рис. 3).

Метасоматической гипотезе образования БГ противоречит отсутствие в них реликтов протолита – минералов вмещающих гранодиоритов или гранитов (биотита, олигоклаза-андезина, ортоклаза, титанита, рутила и др.). Постмагматический генезис БГ не увязывается с равномерным распределением в них аксессуарных минералов (касситерита, монтебразита, топаза, тантало-ниобатов) и отсутствием мономинеральных сегрегаций и цепочечных выделений аксессуариев.

Генезис БГ Кестерского гарполита исследован М.А. Романовой путем математического моделирования структуры пород на базе концепции “идеального гранита” А.Б. Вистелиуса. В соответствии с рабочей гипотезой первично-магматические граниты имеют последовательность межзеренных контактов микроклина, кварца и альбита, не отличимую от простой цепи Маркова. В результате расчета марковских цепей установлено, что кристаллизация БГ происходила в гомогенной среде одновременно во всем пространстве гарполита. Сделан вывод о магматической природе структуры БГ, нарушенной в прикровельной части гарполита вследствие альбитизации и грейзенизации (Романова, 1976; Вистелиус, 1980).

Магматический генезис БГ подтвержден корреляционным анализом их структуры и состава. Сильная корреляционная связь размеров зерен заведомо магматических минералов (микроклина, кварца), с одной стороны, и альбита, слюды и аксессуариев, – с другой, с вероятностью более 0.95 показывает отсутствие в БГ существенных вторичных преобразований. Микроклин, кварц, альбит, светлая слюда, топаз, монтебразит, касситерит солидарно увеличиваются или уменьшаются в размерах в конкретных агрегатах и, следовательно, формируются в едином минералообразующем процессе кристаллизации магмы. В БГ установлена отрицательная корреляция содержаний главных минералов – кварца и щелочных полевых шпатов; прямая зависимость содержания аксессуариев от содержания кварца. Такие закономерности описаны как характерные для магматических агрегатов (Алексеев, 2005). Сильно коррелируют содержания топаза и

монтебразита, что отражает высокую глиноземистость и фтористость, характерную для редкометалльной гранитовой магмы (табл. 2).

Как установлено ранее методами математической геологии (Вистелиус, 1980; Романова, 1980; Алексеев, 2005), для гранитов, претерпевших альбитизацию и грейзенизацию, характерна сильная прямая зависимость содержаний и размеров зерен топаза, слюды и акцессорных минералов от содержания и размера новообразованных кварца и альбита. Исходя из этого, гипотезе метасоматического преобразования БГ противоречат следующие петрографические факты: 1) отсутствие корреляции между содержанием кварца, топаза и слюды; 2) сильная отрицательная корреляция между размером зерен кварца и содержаниями топаза (-0.31), касситерита (-0.24), колумбита-танталита (-0.29), других акцессориев (-0.34); 3) отрицательная корреляция между размерами зерен кварца и акцессориев (-0.34), альбита и акцессориев (-0.39); 4) отрицательная корреляция между размером зерен альбита и содержанием топаза (-0.30) (табл. 2).

Минералогические признаки генезиса “белых гранитов”. Комплекс породообразующих минералов БГ по составу и содержанию компонентов отражает петрохимические особенности микроклин-альбитовых гранитов литий-фтористого типа, но его нередко делят на первичные магматические и вторичные пневматолитовые минералы в рамках гипотезы “апогранитов”. В этой связи особое значение для установления генезиса БГ имеет их акцессорный комплекс, как более устойчивый в процессах постмагматических преобразований. Современная петрология рассматривает акцессорные минералы как одну из форм концентрации редких элементов в магматическом процессе, что позволяет использовать их при изучении петрогенезиса гранитоидов.

Видовой состав и содержание акцессориев БГ соответствует типовому набору минералов субщелочных редкометалльных гранитов: топаз, монтебразит, колумбит-танталит, циркон, вольфрамоиксиолит, ферберит, стрюверит, ильменорутил, ильменит, монацит-(Ce) и др. Акцессории БГ несут типохимические признаки минералов ЛФГ: ниобий- и танталсодержащие касситерит, рутил и ферберит; уран-гафнийсодержащий циркон, оловосодержащие танталит и стрюверит и др. (Коваль, 1975; Коваленко, 1977; Бескин и др., 1979; Ярмолюк и др., 1987; Cunej, 1992; Johan, Johan, 1994; Belkasmi et al., 2000; Руб, Руб, 2006; Алексеев, 2014; Breiter et al., 2017; Alfonso et al., 2018; Emam et al., 2018; René, 2019).

В качестве постоянной примеси в акцессориях БГ (касситерите, колумбите, ферберите, рутиле) выступает тантал – типоморфная примесь и промышленный редкий металл ЛФГ. Встречен нетипичный для постмагматических образований танталсодержащий ферберит (Алексеев и др., 2019). Индикаторное значение имеет касситерит БГ с аномально высоким содержанием Ta_2O_5 5.33%, который не встречается в грейзенах и является типоморфным позднемагматическим минералом редкометалльных гранитов и пегматитов (Максимюк, Воронина, 1989; Tindle, Breaks, 1998). В БГ зафиксирована характерная для колумбита редкометалльных гранитов и пегматитов эволюция состава с нарастанием отношения Ta/Nb от ядра к периферии (Belkasmi et al., 2000; Breiter et al., 2017; Alfonso et al., 2018; René, 2019).

Нами впервые установлена изоморфная примесь вольфрама в минералах группы колумбита из БГ, что характерно для акцессорных комплексов ЛФГ Дальнего Востока (Алексеев, 2014). Важным указанием на происхождение БГ является первая находка в них парагенезиса ниобий-танталсодержащего ферберита и вольфрамоиксиолита, образованного путем полиморфного преобразования колумбита-(Fe). Вольфрамоиксиолит сходного состава распространен в ЛФГ Евразии в виде сростков с вольфрамитом, колумбитом или ниобийсодержащим рутилом и служит минералом-индикатором редкометалльных гранитов и пегматитов (Johan, Johan, 1994; Breiter et al., 2017; Xie et al., 2018; Алексеев и др., 2019; René, 2019).

Образование аксессуарных тантало-ниобатов связано с позднемагматическим этапом кристаллизации редкометалльной гранитовой магмы. При достижении насыщения расплава по Ta и Nb минералы группы колумбита-танталита кристаллизуются из дифференцированного низкотемпературного расплава в субсолидусных условиях (Чевычелов и др., 2010). Под влиянием равновесного с микроклин-альбитовым гранитом флюида происходит образование колумбита метасоматическим путем (Алексеев, 2014). В дальнейшем перераспределение Ta и Nb определяет обрастание колумбита танталитом и трансформацию колумбитовой структуры в вольфрамитовую с образованием вольфрамоиксиолита (Волошин, Пахомовский, 1988; Алексеев, 2019).

Кристаллизация минералов группы колумбита и их замещение вольфрамоиксиолитом рассматривается как своего рода маркер перехода от магматического этапа минералообразования редкометалльных гранитов к пневматолитовому с образованием эволюционного ряда минералов: колумбит → танталит → вольфрамоиксиолит → ниобийсодержащий ферберит (Breiter et al., 2017; Xie et al., 2018; Алексеев и др., 2019). К признакам позднемагматической кристаллизации высокодифференцированного остаточного гранитового расплава, безусловно, относится наличие в БГ циркона с высоким содержанием гафния и урана: отношение Zr/Hf достигает 3.8 (Huang et al., 2002; Kempe et al., 2004; Xie et al., 2018).

Аналоги “белых гранитов”. Одним из аргументов в пользу магматического происхождения якутских БГ служит их всестороннее сходство с породами редкометалльных гранитовых плутоноидов Евразии. Как следует из приведенных геологических, петрологических и минералогических данных, БГ являются аналогами ЛФГ таких массивов, как Этыкинский (Забайкалье), Вознесенский (Приморье), Циновец (Чехия), Нувейби (Египет) и многих других (Бескин и др., 1997; 1999; Ярмолюк и др., 1987; Руб, Руб, 2006; Breiter et al., 2017; Emam et al., 2018). Своеобразие якутских БГ состоит в существенной роли фосфатов – фторапатита, монтебразита и других, что объясняется региональной геохимической специализацией корового субстрата в области генерации редкометалльно-гранитовой магмы (Трунилина и др., 2019). С учетом высокой фосфористости наиболее близкие аналоги БГ – граниты Алахинского массива в Горном Алтае (Кудрин и др., 1994), Эшассьер в Центральном Французском массиве (Коваль, 1975; Cuneu et al., 1992) и Ичун в китайской провинции Цзянси (Belkasmı et al., 2000; Huang et al., 2002).

На Востоке России с 1980-х гг. выделяются малые интрузии ЛФГ, входящие в состав интрузивно-дайковых ареалов онгонитового магматизма. Подобные ареалы образуют протяженный Дальневосточный пояс и контролируют крупные вольфрамово-оловянные и редкометалльные месторождения Тихоокеанского пояса (Алексеев, 2014). Кестерский гарполит в сочетании с сопутствующим дайковым комплексом ЛФГ является одним из элементов Дальневосточной магматической суперпровинции редкометалльных гранитов, с которым генетически связано Кестерское оловянно-редкометалльное месторождение. С учетом всех перечисленных генетических признаков можно сделать вывод, что Западный купол Арга-Ыннах-Хайского гранитоидного плутона был инъецирован флюидонасыщенной гранитовой магмой повышенной щелочности, сформировавшей Кестерский гарполит редкометалльных микроклин-альбитовых гранитов литий-фтористого типа.

ВЫВОДЫ

1. Морфология, залегание и характер контактов Кестерского гарполита “белых гранитов” являются надежными признаками его магматического происхождения. Гарполит сопровождается серией малых интрузий “белых гранитов” и онгонитов, образуя интрузивно-дайковый комплекс редкометалльных гранитов. В экзоконтакте гарполи-

та установлена трубка взрыва, сложенная брекчией с обломками вмещающих гранитоидов главной фазы и цементом из “белых гранитов”.

2. Петрографические и петрохимические особенности “белых гранитов” указывают на их формирование в результате кристаллизации умереннощелочной флюидонасыщенной магмы и позволяют идентифицировать изученные породы как посторогенные редкометалльные высокофосфористые граниты литий-фтористого геохимического типа. Магматический генезис структуры “белых гранитов” и ее частичное метасоматическое преобразование подтверждаются методами статистического анализа.

3. Видовой состав, содержание и химизм аксессуарных минералов “белых гранитов” соответствуют типовому набору и типохимическим признакам минералов субщелочных редкометалльных гранитов, а онтогенетический анализ внутреннего строения и взаимоотношений минералов позволяет сделать вывод, что главные акцессории — касситерит, колумбит, танталит, вольфрамоиксолит, циркон, ферберит — образованы на позднемагматическом этапе эволюции низкотемпературного редкометалльного гранитового расплава в субсолидусных условиях.

4. “Белые граниты” являются аналогами литий-фтористых гранитов ряда редкометалльных интрузивных комплексов Евразии. Кестерский гарполит Арга-Ыннах-Хайского гранитного массива и генетически связанное с ним одноименное оловянно-редкометалльное месторождение входят в состав Дальневосточной магматической суперпровинции редкометалльных гранитов.

Авторы выражают глубокую благодарность главному научному сотруднику ИГГД РАН В.Н. Подковырову за предоставленную возможность использования материалов из личного архива М.А. Романовой, научного сотрудника Лаборатории математической геологии Математического института им. В.А. Стеклова. В исследовании минералов гранитов неоценимую помощь оказала старший научный сотрудник ИГГД РАН О.Л. Галанкина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.И.* О происхождении литий-фтористых гранитов Северного массива (Чукотка) // ЗРМО. **2005.** № 6. С. 19–30.
- Алексеев В.И.* Литий-фтористые граниты Дальнего Востока. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”, **2014.** 244 с.
- Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Галанкина О.Л.* Вольфрамоиксолит в литий-фтористых гранитах Арга-Ыннах-Хайского массива, Якутия // ЗРМО. **2019.** № 3. С. 44–58.
- Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б.* Редкометалльные гранитовые формации. Л.: Недра, **1979.** 280 с.
- Бескин С.М., Марин Ю.Б., Матиас В.В., Гаврилова С.П.* Так что же такое “редкометалльный гранит”? // ЗВМО. **1999.** № 6. С. 28–40.
- Беус А.А., Северов Э.А., Ситнин А.А., Субботин К.Д.* Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты). М.: Изд-во АН СССР, **1962.** 196 с.
- Бродская Р.Л., Марин Ю.Б.* Онтогенетический 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.
- Вистелиус А.Б.* Основы математической геологии (определение предмета, изложение аппарата). Л.: Наука, **1980.** 389 с.
- Волошин А.В., Пахомовский Я.А.* Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. Л.: Наука, **1988.** 238 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-53 – Верхоянск; Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, **2016.** 437 с.
- Ефременко Э.А.* Гранитоидная формация высокоглиноземистого типа в Яно-Борулахском рудном районе Якутии // Геология и геофизика. **1976.** № 3. С. 33–44.
- Иванов О.П.* Формационный анализ оловянных месторождений Яно-Борулахского района / Рудообразование и его связь с магматизмом. Якутск: Якутское книжное издательство, **1969.** С. 67–70.
- Коваленко В.И.* Петрология и геохимия редкометалльных гранитоидов. Новосибирск: Наука, **1977.** 206 с.

Коваль П.В. Петрология и геохимия альбитизированных гранитов. Новосибирск: Наука, **1975**. 260 с.

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

Кудрин В.С., Ставров О.Д., Шурига Т.Н. Новый сподуменовый тип танталоносных редкометальных гранитов // Петрология. **1994**. Т. 2. № 1. С. 88–95.

Максимюк И.Е., Воронина Л.Б. Касситерит / Типоморфизм минералов: Справочник. М.: Недра, **1989**. С. 204–218.

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

Некрасов И.Я. Олово в магматическом и постмагматическом процессах. М.: Наука, **1984**. 238 с.

Орлов Ю.С., Филлимонов 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.

Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Изд-е третье, испр. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, **2009**. 199 с.

Принципы расчленения и картирования гранитоидных интрузий и выделения петролого-металлогенических вариантов гранитоидных серий. СПб.: ВСЕГЕИ, **2007**. 80 с.

Романова М.А. Марковские свойства последовательностей зерен в редкометальных 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.

Романова М.А. Задачи математической геологии при исследовании гранитоидов Якутии / Основные методы математической геологии и результаты исследований. Якутск: ЯФ СО АН СССР, **1980**. С. 18–31.

Руб А.К., Руб М.Г. Редкометальные 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. 64–79.

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

Чайковский В.К. Геология оловоносных месторождений Северо-Востока СССР. М.: Госгеолтехиздат, **1960**. 336 с.

Чевычелов В.Ю., Бородулин Г.П., Зарайский Г.П. Растворимость колумбита (Mn,Fe)(Nb,Ta)₂O₆ в гранитоидных и щелочных расплавах при 650–850 °С и 30–400 МПа: экспериментальные исследования // Геохимия. **2010**. № 5. С. 485–495.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Павлов В.А. Кислые и средние магматические породы областей сопряженной активизации // Магматические горные породы. Кислые и средние породы. М.: Наука, **1987**. Т. 4. С. 234–259.

ON GENESIS OF “WHITE GRANITES” FROM THE KESTERSKY HARPOLITH (ARGA-YNNAKH-KHAYSKY MASSIF, EAST YAKUTIA)

V. I. Alekseev^{a,*} and Yu. B. Marin^a

^a*Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*

**e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru*

The questions of genesis of “white granites” in the Kestersky harpolith of the Arga-Ynnakh-Khaysky massif are addressed. Morphology, attitude and features of intrusive contacts of the Kestersky harpolith prove its magmatic origin. Petrographic and petrochemical properties of “white granites” allow identifying them as postorogenic rare-metal high-phosphorus granites of the lithium-fluoric geochemical type. Magmatic genesis of “white granites” structure are confirmed by statistical methods. Species composition of accessory minerals, their typomorphic features, ontogenetic analysis of their internal structure and mutual relationship allow to conclude, that the main accessories of the granites – cassiterite, columbite, tantalite, wolframioxiholite, zircon, ferberite – were formed at the late-magmatic stage of evolution of the low-temperature rare-metal granite melt at subsolidus conditions. The Kestersky harpolith in the Arga-Ynnakh-Khaysky granite massif, and the same-named tin-rare-metal deposit genetically connected with it, are a part of the Far East superprovince of rare-metal granites.

Keywords: rare-metal high-phosphorus lithium-fluoric granite, accessory minerals, cassiterite, columbite-tantalite, Kestersky harpolith, Yakutia

REFERENCES

- Alekseev V.I. About an origin of lithium-fluoric granite in the Northern massif (Chukotka). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2005**. N. 6. P. 19–30 (in Russian).
- Alekseev V.I. Lithium-fluoric granites of the Far East. Saint Petersburg: Saint-Petersburg Mining University, **2014**. 244 p. (in Russian).
- Alekseev V.I., Marin Yu.B., Galankina O.L. Wolframioxiolite in lithium-fluoric granites of the Argaynnakh-Khaysky massif, Yakutia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019**. N 3. P. 44–58 (in Russian).
- Alfonso P., Hamid S.A., Garcia-Valles M., Llorens T., Moro F.J.L., Tomasa O., Calvo D., Guasch E., Anticó H., Oliva J., Parcerisa D., Polonio F.G. Textural and mineral-chemistry constraints on columbite-group minerals in the Penouta deposit: evidence from magmatic and fluid-related processes. *Miner. Mag.* **2018**. Vol. 82. P. S199–S222.
- Belkasmi M., Cuney M., Pollard P.J., Bastoul A. Chemistry of the Ta-Nb-Sn-W oxide minerals from the Yichun rare metal granite (SE China): genetic implications and comparison with Moroccan and French Hercynian examples. *Miner. Mag.* **2000**. Vol. 64. N. 3. P. 507–523.
- Beskin S.M., Larin V.N., Marin Yu.B. Rare-metal granite formations. Leningrad: Nedra, **1979**. 280 p. (in Russian).
- Beskin S.M., Marin Yu.B., Matias V.V., Gavrilova S.P. What does it really mean: “rare-metal granite”? *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1999**. N 6. P. 28–40 (in Russian).
- Beus A.A., Severov E.A., Sitnin A.A., Subbotin K.D. Albitized and greisenized granites (apogranite). Moscow: Acad. Sci. USSR, **1962**. 196 p. (in Russian).
- Breiter K., Korbellová 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). *Europ. J. Miner.* **2017**. Vol. 29. 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).
- Chaikovskiy V.K. Geology of tin-ore deposits in Northeast USSR. Moscow: Gosgeoltekhizdat, **1960**. 336 p. (in Russian).
- Chevychelov V.Yu., Borodulin G.P., Zarajsky G.P. Solubility of columbite (Mn, Fe)(Nb,Ta)₂O₆ in granitoid and alkaline melts at 650–850°C and 30–400 MPa: an experimental investigation. *Geochem. Int.* **2010**. N. 5. P. 485–495.
- Cuney M., Marignac C., Weisbrod A. The beauvoir topaz-lepidolite albite granite (Massif Central, France): the disseminated magmatic Sn–Li–Ta–Nb–Be mineralization. *Econ. Geol.* **1992**. Vol. 87. P. 1766–1794.
- Efremenko E.A. Granitoid formation of high-aluminous type in Jano-Borulach ore district of Yakutia. *Geol. Geophys.* **1976**. No. 3. P. 33–44 (in Russian).
- Emam A., Zoheir B., Radwan A.M., Lehmann B., Zhang R.Q., Fawzy S., Nolte N. Petrogenesis and evolution of the Nuweibi rare-metal granite, Central Eastern Desert, Egypt. *Arabian J. Geosci.* **2018**. Vol. 11. N. 23. Paper: 736.
- Flerov B.L., Indolev L.N., Jakovlev Ya.V., Bichus B.Ya. Geology and genesis of ore-tin deposits of Yakutia. Moscow: Nauka, **1971**. 318 p. (in Russian).
- Huang X.L., Wang R.Ch., Chen X.M., Hu H., Liu C.S. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. P. 1047–1068.
- Ivanov O.P. Formations analysis of tin-ore deposits in Jano-Borulach district. In: *Ore formation and its communication with magmatism*. Yakutsk: Yakut book publishing house, **1969**. P. 67–70 (in Russian).
- 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.
- Kempe U., Gruner T., Renno A.D., Wolf D., René M. Discussion on Wang et al. (2000): Chemistry of Hf-rich zircons from the Laoshan I- and A-type granites, Eastern China. *Miner. Mag.* **2004**. Vol. 68. N. 4. P. 669–675.
- Kovalenko V.I. Petrology and geochemistry of rare-metal granitoids. Novosibirsk: Nauka, **1977**. 206 p. (in Russian).
- Koval' P.V. Petrology and geochemistry of albitized granites. Novosibirsk: Nauka, **1975**. 260 p. (in Russian).
- Kokunin M.V. Rare minerals of the forgotten deposit. *Native Geology*. **2011**. N 1. P. 72–82 (in Russian).
- Kudrin V.S., Stavrov O.D., Shuriga T.N. New spodumene type of tantalum-bearing rare-metal granite. *Petrology*. **1994**. Vol. 2. N 1. P. 88–95 (in Russian).

Maeda J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido, North Japan. *Tectonophysics*. **1990**. N. 174. P. 235–255.

Maksimyuk I.E., Voronina L.B. Cassiterite. In: *Type-morphism of minerals: Guidebook*. Moscow: Nedra, **1989**. P. 204–218 (in Russian).

Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **1989**. Vol. 101. P. 635–643.

Nedosekin Yu.D. Rare-metal granites in Northeast USSR. Moscow: Nauka, **1988**. 142 p. (in Russian).

Nekrasov I.Ya. Tin in magmatic and postmagmatic processes. Moscow: Nauka, **1984**. 238 p. (in Russian).

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: Yakut book publishing house, **1984**. P. 74–81 (in Russian).

Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, and impact formations. Third edition, corrected and supplemented. Saint Petersburg: VSEGEI, **2009**. 200 p. (in Russian).

Principles of a partition and plotting of granitoid intrusions and allocation petrological-metallogenical variants of granitoid series. Saint Petersburg: VSEGEI, **2007**. 80 p. (in Russian).

René M. Nb–Ta–Ti Oxides in topaz granites of the Geyer Granite Stock (Erzgebirge Mts., Germany). *Minerals*. **2019**. Vol. 9. N. 3. P. 155.

Romanova M.A. Markovsky properties of grains sequences in rare-metal granite, their use at search works and petrological researches. In: *Geological information and mathematical geology. Int. Geol. Congr. XXV session*. Moscow: Nedra, **1976**. P. 53–65 (in Russian).

Romanova M.A. Problems of mathematical geology at research of granitoid in Yakutia. In: *Fundamental methods of mathematical geology and results of researches*. Yakutsk: YaF SB Acad. Sci. USSR, **1980**. P. 18–31 (in Russian).

Rub A.K., Rub M.G. Rare-metal granites of Primorye. Moscow: VIMS, **2006**. 86 p. (in Russian).

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).

Tindle A.G., Breaks F.W. Oxide minerals of the Separation Rapids rare-element granitic pegmatite group, northwestern Ontario. *Canad. Miner.* **1998**. Vol. 36. P. 609–635.

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. 38. No. 1. P. 64–79 (in Russian).

Vistelius A.B. Basic of mathematical geology (subject definition, a device statement). Leningrad: Nauka, **1980**. 389 p. (in Russian).

Voloshin A.V., Pahomovskiy Y.A. A minerals and evolution of minerogenesis in amazonite pegmatite from Kola peninsula. Leningrad: Nauka, **1986**. 168 p. (in Russian).

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.

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Pavlov V.A. Acidic and mean magmatic rocks of areas of the interfaced activation. In: *Magmatic rocks. Acidic and mean magmatic rocks*. Moscow: Nauka, **1987**. Vol. 4. P. 234–259 (in Russian).