

УДК 533.4:550.4

СОСТАВЫ РАСПЛАВОВ И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ГРАНИТОВ И ПЕГМАТИТОВ ТИГРИНОГО Sn–W-МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПРИМОРЬЕ)

© 2014 г. С. З. Смирнов, академик Н. С. Бортников, В. Г. Гоневчук, Н. В. Гореликова

Поступило 19.12.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565214130246

ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследователей признает, что грейзеновые Sn–W-месторождения генетически связаны с глубоко дифференцированными гранитами. Однако природа минералообразующего флюида и его связь с магматическими процессами остаются предметом дискуссий. В этом отношении развиваются две гипотезы, предполагающие, что рудообразующий флюид возник в результате магматической дистилляции [1] либо его образование связано с взаимодействием и уравновешиванием с кристаллизующейся гранитной магмой флюида, имеющего метаморфогенное, осадочное или даже мантийное происхождение [2]. Наименее изученным остается магматический этап эволюции флюидной фазы, которая в дальнейшем играет определяющую роль в образовании гидротермальной минерализации. Одним из путей проверки и дальнейшего обоснования предложенных гипотез является изучение эволюции флюида от этапа магматической кристаллизации до формирования рудных тел в рамках одной рудно-магматической системы. Цель данного исследования — определение составов исходных расплавов и флюидного режима при кристаллизации гранитов и пегматитов Тигринового Sn–W-месторождения по результатам изучения ассоциаций флюидных и расплавных включений в кварце.

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск*

*Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Российской Академии наук, Москва*

*Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток
Новосибирский государственный университет
Томский государственный университет*

ГЕОЛОГИЯ

Месторождение Тигриное [3, 4] расположено в центральной части Сихотэ-Алиня (Приморье). Здесь, к месту сопряжения Центрально-Сихотэ-Алинского и Тигринского разломов, приурочены мелкие интрузии биотитсодержащих гранит-порфиров Большого штока и среднезернистых, иногда порфиоровидных, протолитионит-циннвальдитовых гранитов Малого штока, относящихся к первой и второй фазам внедрения редкометалло-гранитной магмы соответственно. Бурением в составе Малого штока вскрыто тело порфиоровидных циннвальдитовых гранитов, интерпретируемое как третья фаза. К этим телам приурочены обширные зоны грейзенизации, жильных штоков и рудные брекчии, входящие в состав крупного Sn–W-месторождения. В составе Малого штока установлены также мелкие тела пегматитов (штокшайдеров), развитые на контактах магматических пород разных фаз и вдоль их контактов с ороговикованными вмещающими осадочными породами и грейзеновыми телами внутри самих гранитов. Результаты исследования включений в магматических и гидротермальных образованиях месторождения были изложены в [5, 6], однако информация об особенностях составов магматических расплавов и параметрах сосуществующей с ними флюидной фазы остается отрывочной.

РАСПЛАВНЫЕ И ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Порфиоровые вкрапленники кварца в гранит-порфирах Большого и порфиоровидных гранитах Малого штоков содержат многочисленные расплавные и флюидные включения. Расплавные включения расположены группами или поодиночке (рис. 1а–в). размеры их невелики, но довольно часто до 20 мкм. Помимо агрегата дочерних кристаллических фаз, включения содержат флюидное обособление, о чем свидетельствует

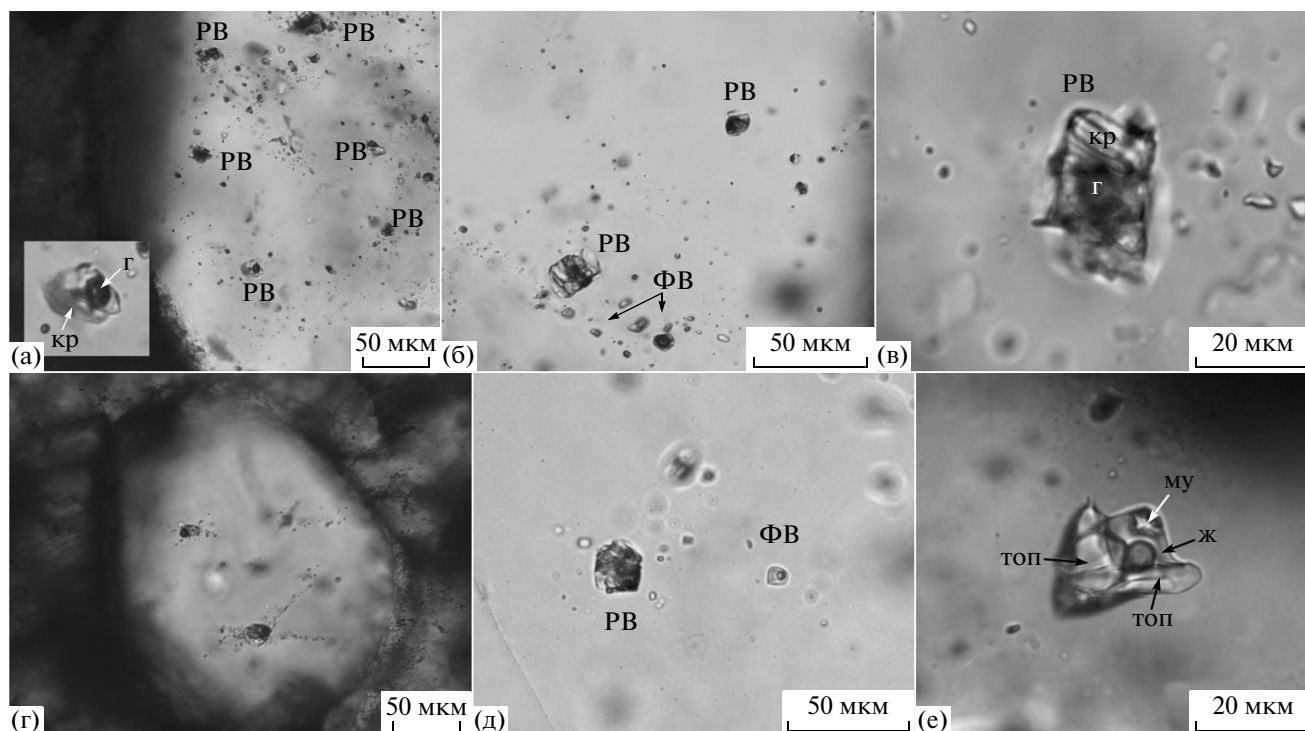


Рис. 1. Расплавные и флюидные включения в кварце редкометальных гранитов и пегматитов месторождения Тигриное. а–в – Включения в кварце Большого (а, б), Малого (в) штоков; г–е – включения в кварце пегматитов (штокшайдеров): декрипитированные расплавные включения (г), сингенетичные расплавное (PB) и флюидное (ФВ) включения (д), комбинированное флюидное (газ + жидкость – г + ж) включение с захваченными кристаллами топаза – топ и, вероятно, дочерними кристаллами мусковита – му (е).

наличие газовой фазы, видимой в большинстве из включений. На рис. 1а (врезка) видна группа, в которой одно содержит отчетливо различимую флюидную фазу. В некоторых из включений газовый пузырек имеет округлые или изометричные очертания (рис. 1а, в), что свидетельствует о наличии в них жидкой фазы.

Присутствующие в кварце гранитов флюидные включения в большинстве своем имеют вторичную природу. На рис. 1б видно, что серия таких включений, сопутствующих расплавному (отмечены стрелкой), приурочена к залеченной трещине. Включения, которые можно было бы с уверенностью считать сингенетичными с расплавленными, во вкрапленниках гранит-порфиров и порфировидных гранитов не обнаружены.

В отличие от гранитов, в кварце пегматитов наряду с первичными расплавленными включениями удалось обнаружить включения флюида, которые можно с уверенностью считать магматическими. Расплавные включения часто окружены залеченными трещинами, расходящимися радиально (рис. 1г). На рис. 1д изображено первичное двухфазовое газовой-жидкое включение вблизи расплавленного. Такие включения можно однозначно рассматривать как сингенетичные. На рис. 1е показано газовой-жидкое включение, комбиниро-

ванное с кристаллами – узниками топаза. В нем также присутствует агрегат кристаллов мусковита, который, вероятнее всего, дочерний. В этом же вкрапленнике обнаружены первичные расплавленные включения, что позволяет считать магматическими топаз и захваченную с ним флюидную фазу.

Для получения информации о составе расплавов были проведены эксперименты по прогреву зерен кварца из гранитов и пегматитов в автоклаве, заполненном тяжелой водой, при 750–550°C, 1 кбар в соответствии с методикой [7].

Гомогенные включения в кварце гранитов и пегматитов обнаруживали после закалки при 550°C. Это главным образом включения не более 5–10 мкм. При 650°C наличие многочисленных мелких гомогенных включений становится нормой. В большинстве образцов после таких прогревов практически все нормальные включения содержат фазу гомогенного стекла либо стекло и очень маленький газовый пузырек. Эти данные не позволяют с достаточной точностью установить температуры кристаллизации расплава, но можно определенно заключить, что образование гранитов и пегматитов происходило при 550–600°C. После закалки при 700–750°C включения практически всех размеров содержат гомогенное

Таблица 1. Средние составы гранитов и пегматитов месторождения Тигриное и закаленных стекол расплавных включений в их кварце (мас. %)

Компонент	Граниты, 1-я фаза			Граниты, 2-я фаза			Пегматит, обр. АГ-483			Пегматит, обр. АГ-380		Пегматит [‡]
	Порода (10)	Стекло (9)	Стд. откл.	Порода (16)	Стекло (3)	Стд. откл.	Порода	Стекло (6)	Стд. откл.	Порода	Стекло (1)	
SiO ₂	75.74	70.23	1.5	75.73	72.29	3.5	67.26	68.43	3.2	65.91	70.92	69.46
Al ₂ O ₃	13.34	12.90	1.1	13.18	13.18	1.9	15.40	12.58	1.6	15.40	12.83	16.40
Fe ⁺	0.73	0.56	0.2	0.75	0.04	0.0	2.28	0.10	0.1	2.58	0.09	0.22
MgO	0.13	0.00	0.0	0.10	0.00	0.0	0.06	0.01	0.0	0.03	0.00	0.09
CaO	0.48	0.24	0.1	0.45	0.04	0.0	0.16	0.04	0.0	0.23	0.05	0.54
MnO	0.01	0.04	0.0	0.03	0.03	0.0	0.08	0.04	0.0	0.07	0.07	0.25
Na ₂ O	4.00	3.83	0.5	4.13	5.02	1.3	3.41	4.58	1.1	3.51	5.87	2.80
K ₂ O	4.98	3.67	0.4	4.52	2.52	0.8	7.13	2.58	0.7	8.05	3.41	9.48
Rb ₂ O	0.05	нпо	—	0.13	0.23	0.0	0.20	0.20	0.1	0.20	0.25	—
Cs ₂ O	—	нпо	—	—	нпо	—	—	0.06	0.1	—	0.07	—
F	0.53	1.14	0.2	0.55	2.27	0.6	—	1.58	1.1	—	1.10	0.497
Cl	—	0.09	0.0	—	—	—	—	0.04	0.0	—	0.03	—
Сумма (–F)		92.70			95.63			90.26			94.49	99.65
H ₂ O*		7.3			4.4			9.7			5.5	

Примечание. Среднее арифметическое значение (количество анализов); стд. откл. — стандартное отклонение для стекла; ⁺ — железо общее, * — содержание воды, оцененное по недостатку суммы; по данным химических анализов содержание воды не превышает 0.2%; [‡] — среднее по двум анализам пегматитов из гранитов 2-й фазы; составы гранитов 1-й, 2-й фаз по [2]; анализы обр. АГ-483, АГ-380 выполнены методом РСФА (ИГЕМ РАН, г. Москва); анализы стекол — методом рентгеноспектрального анализа (ИГМ СО РАН, Новосибирск) при токе зонда 10 нА пучком, расфокусированным до 5 мкм; потерю Na определяли по изменению интенсивности линии K α Na в течение 30 с; нпо — ниже предела обнаружения; — — не определяли.

стекло либо стекло и маленький газовый пузырек. Одинаковое поведение включений в кварце гранитов и пегматитов при нагревании может указывать на идентичность их материнских расплавов.

Усредненные составы стекол наиболее представительных прогретых расплавных включений в кварце гранитов и пегматитов показаны в табл. 1. Стекла включений высокоглиноземистые (А/СНК ~ 1.2) и характеризуются несколько пониженными по сравнению с самими породами содержаниями SiO₂. Исключение — включение из кварца пегматита АГ-380, стекло которого имеет индекс глиноземистости около 0.95. По содержанию щелочей это включение близко к границе пород нормального и субщелочного рядов.

Стекла включений в кварце гранитов второй фазы и пегматитов имеют высокое содержание F, повышенное — Rb₂O, H₂O, низкое — Cl. Присутствие воды в составе включений достоверно установлено рамановской спектроскопией (рис. 2а). Интенсивность линии рамановского спектра около 3450 см⁻¹ позволяет предполагать значительное содержание воды в захваченном расплаве. Анализ одного из включений в кварце методом LA-ICP-MS показал, что стекла включений в кварце пегматитов содержат около 400 Li и 350 г/т

В. Концентрации других редких и рассеянных элементов не превышают 100 г/т. Это позволяет считать, что недостаток суммы электронно-микронного анализа стекол обусловлен содержанием воды около 4–10 мас. %.

Включения магматического флюида гомогенизируются в жидкую фазу. Существенно газовые среди этих включений отсутствуют. Газовая фаза включений и флюидных обособлений расплавных включений содержит значительное количество метана без значимых концентраций углекислоты и других газов, что подтверждается данными рамановской спектроскопии (рис. 2б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Используя полученные результаты, мы можем оценить составы расплавов, формировавших минеральные ассоциации гранит-порфиров, гранитов, пегматитов.

На диаграмме (рис. 3), которая часто используется для классификации редкометальных гранитов, по соотношению нормативных альбита, ортоклаза, кварца составы исследованных нами магматических пород занимают положение, близкое к гаплогранитному минимуму. При этом

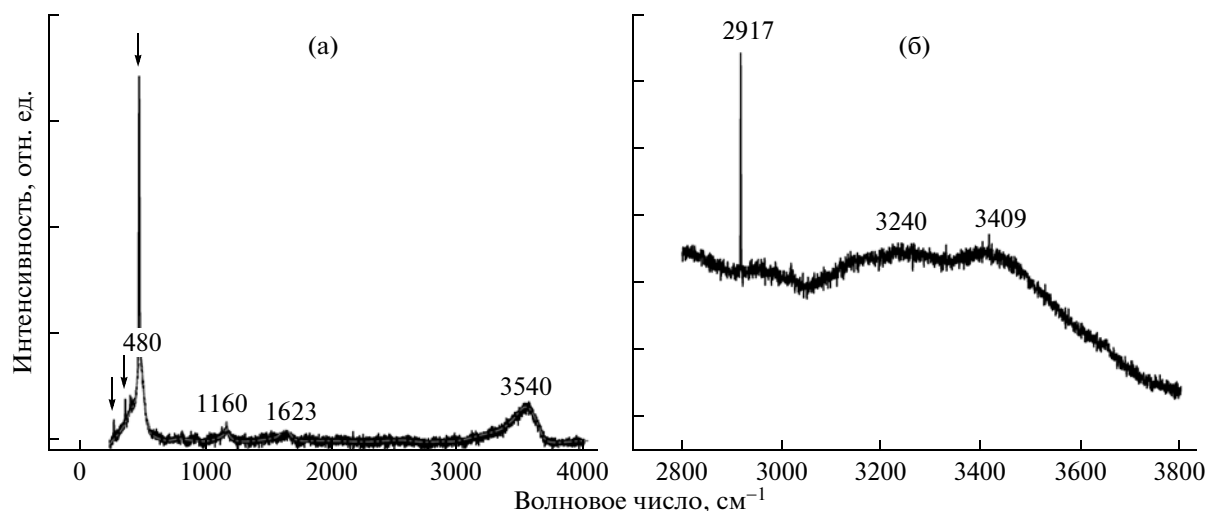


Рис. 2. Рамановские спектры расплавных включений: а – спектр закалочного стекла расплавного включения в кварце, где серой штрихпунктирной линией на фоне основного спектра показана составляющая, отвечающая силикатному стеклу, с широкой линией около 480 см^{-1} (колебания O–Si–O), слабой при 1600 см^{-1} и широкой асимметричной линией около 3550 см^{-1} (колебания O–H)); б – спектр флюидного обособления комбинированного включения, изображенного на рис. 1е, с узкой линией метана (2917 см^{-1}) и широкой линией жидкой воды ($3240, 3409\text{ см}^{-1}$).

граниты второй и третьей фаз смещаются относительно минимума в сторону альбитовой вершины, образуя типичную последовательность, отвечающую тренду дифференциации высокофтористых гранитных магм [8].

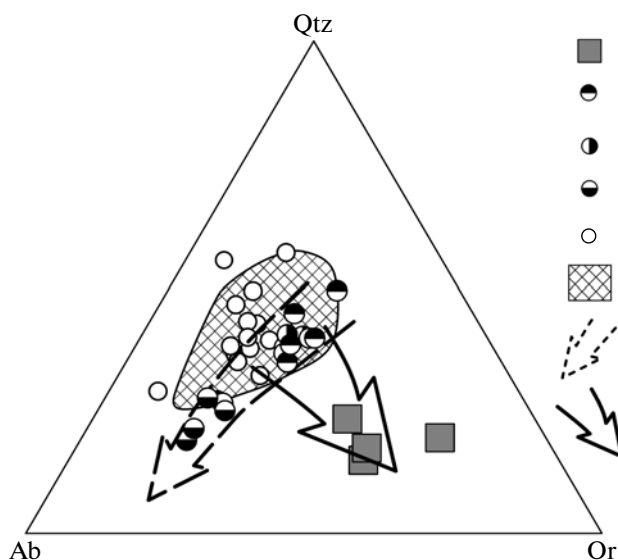


Рис. 3. Эволюция составов редкометальных расплавов при образовании гранитов и пегматитов месторождения Тигриное в пересчете на нормативные кварц (Qz), альбит (Ab), ортоклаз (Or). Валовые составы пород по [1, 2].

1 – пегматиты; 2–4 – гранит-порфиры и порфиоровидные граниты: 2 – 1-й фазы, 3 – 2-й фазы, 4 – 3-й фазы; 5, 6 – стекла расплавных включений: 5 – в пегматитовом кварце, 6 – в кварце гранит-порфира; 7 – тренд дифференциации гранитоидной магмы; 8 – влияние флюидно-магматического взаимодействия.

Составы стекол расплавных включений в кварце гранитов мало отличаются от составов пород. Это означает, что кварц является ранней фазой, захватывавшей расплавы, не претерпевшие значительной дифференциации. Однако присутствие включений с более низкими концентрациями SiO_2 и высокими содержаниями F предполагает, что некоторые из них сингенетичны более дифференцированным расплавам.

Составы стекол включений в кварце пегматитов попадают в область составов включений в гранитах и близки к валовому составу гранитов ранних фаз внедрения. Установленное для многих включений увеличение (по сравнению с гранитными) содержания Rb и F свидетельствует о более глубокой дифференциации материнского расплава. В отличие от гранитов, составы стекол включений в кварце пегматитов резко отличаются от их валового состава: валовые составы пегматитов смещены в сторону ортоклазовой вершины диаграммы. Это предполагает, что в формировании пегматитов помимо магматической дифференциации значительную роль играло перераспределение щелочей за счет привноса K извне.

Наличие включений магматического флюида и флюидных обособлений в расплавных включениях показывает, что магматическая кристаллизация протекала при высоком флюидном давлении. В некоторых случаях повышенное флюидное давление во включениях привело к их декрепитации при остывании магматической породы. Редкость включений магматического флюида в кварце гранитов – признак того, что их кристаллизация происходила при условиях, близких к насыщенности водой, хотя количество свободной флюид-

ной фазы было, вероятно, невелико. Напротив, обилие сингенетичных флюидных и расплавных включений в кварце пегматитов предполагает, что в отдельных участках очага расплав сосуществовал со значительным количеством флюидной фазы. Опираясь на спектры флюидных обособлений расплавных включений, можно заключить, что этот флюид имел метаново-водный состав. Такие условия с наибольшей вероятностью реализовывались в зоне контакта гранитоидов с вмещающими терригенными породами и между собой. Можно утверждать, что резкое обогащение валового состава пегматитов калием по сравнению с гранитами ранних фаз и составами стекол расплавных включений (рис. 3) на фоне сохранности первичных пегматитовых структур и включений материнского расплава в кварце связано не с постмагматическим метасоматозом, а флюидно-магматическим взаимодействием.

Значительные количества метана и других углеводородных газов были зафиксированы во включениях в минералах щелочных магматических пород и во вкрапленниках оливина в базальтах и породах мантийного происхождения [9–11]. В то же время метан не является типичным флюидным компонентом, отделяющимся при дегазации гранитной магмы, и ранее не был установлен в составе расплавных и сингенетичных с ними флюидных включений. Исследования в областях активной тектоники и вулканизма показывают, что в составе газовых эманаций и термальных источников часто присутствует около 1.5 об. % CH_4 [12]. В определении природы метана в этом случае предлагаются два варианта: эманации мантийных газов и флюид, образующийся при метаморфизме толщ, богатых органическим веществом [12].

Заметные концентрации метана характерны для флюидных включений в кварце жильных тел с W–Mo- и Sn–W-минерализацией [13], где он ассоциирует с углекислотой и водой. Метан – индикатор восстановительных условий, которые способствуют осаждению молибденита и переносу олова водными растворами. В [13] показано, что кварц жил молибденового этапа формирования Sn–W–Mo-месторождений содержит преимущественно метаново-водные растворы, в то время как в кварце жил оловянного этапа присутствуют включения, где водные растворы помимо метана содержат значительную долю углекислоты. Имеющиеся данные о газовом составе рудообразующего флюида месторождения Тигриное [5, 6, 14] позволяют в общих чертах рассматривать процесс постмагматического рудообразования, но недостаточны для того, чтобы охарактеризовать флюидный режим и определить соотношение основных газовых компонентов (воды, углекислоты, метана) на магматическом этапе.

Совокупность геологических, петрологических и полученных нами термобарогеохимических данных позволяет предположить три сценария образования флюида магматического этапа развития рудно-магматической системы месторождения Тигриное.

Первый сценарий предполагает, что богатый метаном водный флюид мог образоваться при метаморфизме углеродсодержащих пород Журавлевского турбидитового террейна в области генерации гранитной магмы.

Второй сценарий, близкий к первому по механизму, предполагает образование метано-водного флюида при контактовом метаморфизме пород, вмещающих Li–F-граниты Большого и Малого штоков, при условии, что они содержали углеродистое вещество. Флюиды, возникшие в результате действия этого сценария, могли оказывать влияние только на маломощную приконтактовую зону интрузивов ранних фаз внедрения, что не согласуется с данными нашего исследования.

Третий сценарий предполагает, что образование магматического очага (или очагов) и его последующая эволюция, на определенном этапе которой образовались редкометальные литий-фтористые гранитоиды месторождения Тигриное, происходило при участии флюида мантийного происхождения, в котором основными летучими компонентами были вода и метан. Фильтрующийся в зоне глубинного разлома через магматический очаг “мантийный” флюид (сквозьмагматический флюид, по Д.С. Коржинскому [2]) смешивался с водой, выделявшейся из гранитной магмы при ее кристаллизации. В пользу такого сценария свидетельствует локализация месторождения на сопряжении разломов, разделяющих разнородные террейны и по своей природе достигающих литосферной мантии. Признак значительного участия мантийного вещества в формировании магматических образований месторождения – присутствие в рудном поле штока монзонитов, становление которого предшествовало образованию редкометальных гранитов и послегранитных даек пикритовых базальтов.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать заключение о том, что образование гранитов и пегматитов на месторождении Тигриное связано с эволюцией обогащенной F и редкими щелочами редкометальной магмы. Пегматиты можно рассматривать как результат кристаллизации сравнительно небольших участков очага этой магмы, содержащих большое количество метаново-водной флюидной фазы. Наличие этой фазы, имеющей, вероятно, сложную “корово-мантийную” природу, могло обеспечить привнос K, изменение состава расплава, формировавшего пег-

матиты, а также активно участвовать в процессах транспорта и отложения Sn, W, Mo в гидротермальных жилах месторождения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 13–05–00471а, 11–05–00942а и 13–05–12043 офи-м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М.: Наука, 1990. 181 с.
2. Коржинский Д.С. В кн.: Кора и верхняя мантия Земли. М.: Наука, 1968. С. 69–74.
3. Руб М.Г., Руб А.К., Кривошеков Н.Н., Ашихмина Н.А. // Петрология. 1998. Т. 6. № 1. С. 16–29.
4. Гоневчук В.Г., Коростелев П.Г., Семеняк Б.И. // Геология руд. месторождений. 2005. Т. 47. № 3. С. 249–264.
5. Пахомова В.А., Руб А.К., Хетчиков Л.Н., Руб М.Г. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1992. № 4. С. 64–73.
6. Крылова Т.Л., Pandian M.S., Бортников Н.С., Vijaya Anand S., Гореликова Н.В., Гоневчук В.Г., Коростелев П.Г. // Геология руд. месторождений. 2012. Т. 54. № 4. С. 329–349.
7. Смирнов С.З., Томас В.Г., Соколова Е.Н., Курьянов И.Н. // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 5. С. 690–703.
8. Коваленко В.И. Петрология и геохимия редкометальных гранитоидов. Новосибирск: Наука, 1977. 205 с.
9. Konnerup-Madsen J., Dubessy J., Rose-Hansen J. // Lithos. 1985. V. 18. P. 271–280.
10. Бакуменко И.Т., Томиленко А.А., Базарова Т.Ю., Ярмолюк В.В. // Геохимия. 1999. № 12. С. 1352–1356.
11. Liu W., Fei P. X. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2005. V. 242. № 3/4. P. 286–301.
12. Mazzini A., Svensen H., Etiope G., Onderdonk N., Banks D. // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2011. V. 205. P. 67–83.
13. Бортников Н.С., Ханчук А.И., Крылова Т.Л., Аникина Е.А., Гореликова Н.В., Гоневчук В.Г., Игнатьева А.В., Кокорин А.М., Коростелев П.Г., Ломм Т. // Геология руд. месторождений. 2005. Т. 47. № 6. С. 537–570.
14. Родионов С.М., Шапенко В.В., Родионова Л.Н. // Геология руд. месторождений. 1984. № 1. С. 22–30.