Отчет по проекту фундаментальных научных исследований для молодых сотрудников и аспирантов на право получения гранта СМУ ГИН СО РАН - 2022

1. Название: Условия формирования бериллиевой минерализации Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле).

2. Аннотация: Информация об условиях и причинах формирования штокверковых (грейзеновых) W-Mo (Be) месторождений в настоящее время является неполной и отрывочной и требует дополнительных исследований для уточнения. В особенности это касается данных по флюидному режиму, газово-солевому составу, P-T-X параметрам, продуцирующих жильно-штокверковое W-Mo(Be) оруденение. Проект направлен на получение новых данных об условиях и источниках формирования бериллиевого оруденения в молибденовых рудах Первомайского месторождения (Джидинское рудное поле). Целью работы является определение минерального состава, физико-химических параметров, источников вещества, металлоносность растворов и происхождения молибден-бериллиевой минерализации, а также ее взаимоотношений с кварц-молибденитовым оруденением на Первомайском месторождении (Джидинское рудное поле). Решение поставленных настоящим проектом задач происходило путем применения комплекса минералого-петрографических, изотопных, термобарогеохимических и микроаналитических методов исследования. Полученные в ходе выполнения проекта данные об источниках и составе рудообразующих растворов, а также физико-химических условиях формирования W-Mo(Be) оруденения позволят уточнить геолого-генетическую модель формирования месторождений этого типа.

3. Целью работы является определение физико-химических параметров, источников вещества и происхождения молибден-бериллиевой минерализации, а также ее взаимоотношений с кварц-молибденитовым оруденением на Первомайском месторождении (Джидинское рудное поле).

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи:** Определение состава минеральных парагенезисов, способа образования (выполнение/замещение) и состава вмещающих пород для бериллиевого оруденения; определение взаимоотношений бериллиевой стадии с молибденовой минерализацией; изотопный анализ; предварительная оценка щелочности-кислотности рудообразующих растворов; петрография флюидных включений: выявление и типизация флюидных включений в минералах гидротермалитов, пригодных для термометрического и микроаналитического изучения; изучение включений минералообразующих растворов методами термо- и криометрии, волюмометрии для определения температур гомогенизации, солевого и газового состава, состава твердых фаз и P-T параметров рудоотложения; систематизация и обобщение полученных результатов, сопоставление их с имеющимися экспериментально-расчетными данными.

4. Важнейшие результаты: Кварц-бериллиевое оруденение выделяется как самостоятельная более поздняя стадия минералообразования. Кварц-берилловые прожилки распространены в эндо- и экзоконтакте Первомайского штока и пересекают кварц-молибденитовые прожилки, что свидетельствует о их более позднем образовании. На рисунке 1 показана схематическая зарисовка, построенная по данным геологических наблюдений, где отчетливо видно, что кварц-берилловые прожилки секут кварц-молибденитовые, а их в свою очередь секут кварц-пиритовые прожилки (рис. 1).

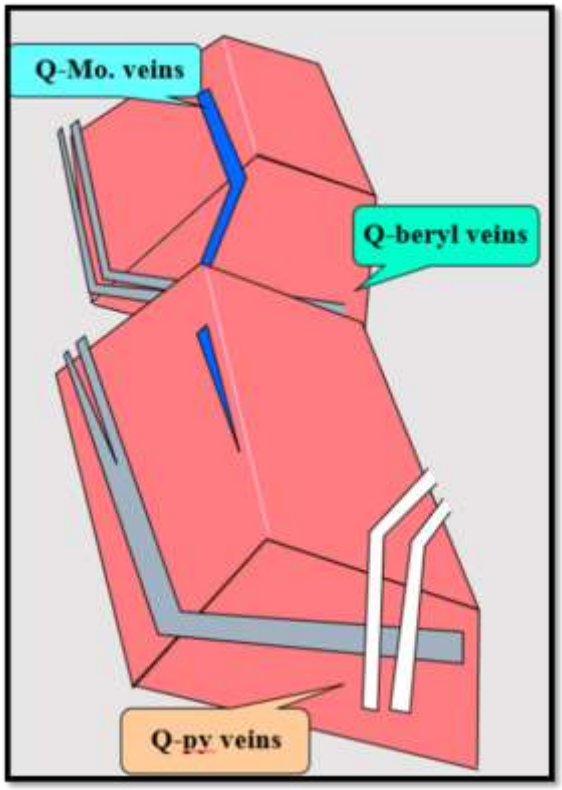

Рисунок 1. *Схематическая зарисовка взаимоотношения кварц-молибденитовых и кварц-берилловых прожилков (по Ф.Г. Рейфу).*

Породы, вмещающие оруденение, так же, как и для кварц-молибденитового оруденения, представлены гранит-порфирами.

Кварц-берилловые прожилки имеют достаточно четкие резкие границы с вмещающими породами. Часто кристаллы берилла растут от стенок прожилков. Что свидетельствует о том, что вероятнее всего, данные прожилки образовались путем выполнения трещин. Мощность прожилков варьирует от ~1 до 10 см.

Главными жильными минералами являются кварц и берилл. Также среди жильных отмечается калиевый полевой шпат, флюорит и мусковит. Впервые на Первомайском месторождении определен фенакит. Рудные минералы представлены молибденитом, пиритом и редкими зернами касситерита, халькопирита, рутила, айкинита, вульфенита, колумбита, монацита и ксенотима (рис.2). На основе анализа минерального состава кварц-берилловых прожилков можно сделать вывод о том, что в составе рудообразующих растворов присутствовали такие элементы, как Si, Na, K, Al, Ca, Fe, F, S, Be, Mo, Sn, Pb, Cu, Ti, Mn, Bi, Nb, РЗЭ, P, Ba.

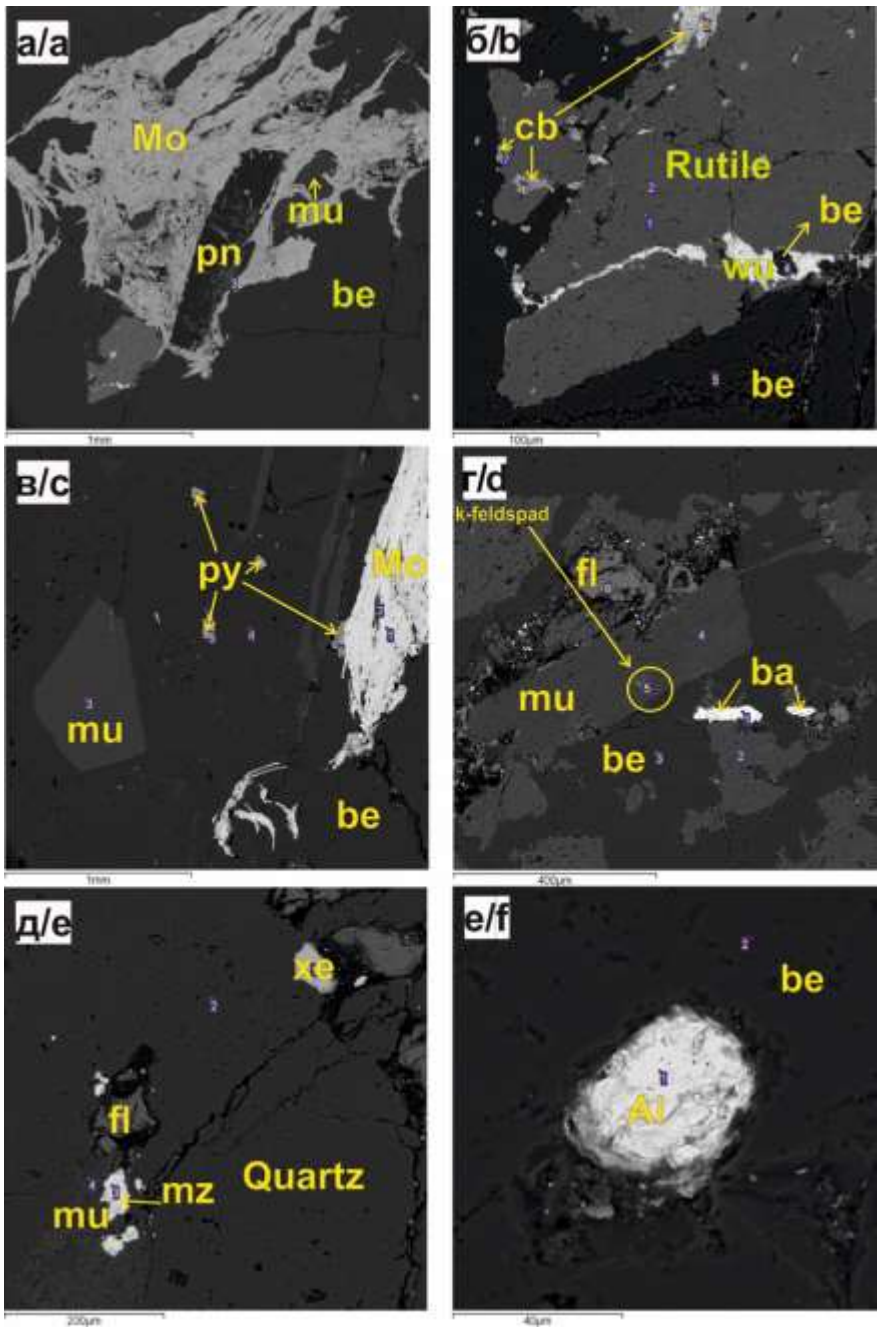

Рисунок 2. *Фотографии минералов из кварц-берилловых прожилков в обратно-рассеянных электронах.*

Условные обозначения: mo- молибденит, mu- мусковит, be- берилл, pn- фенакит, ai- айкинит, mz- монацит, xe- ксенотим, fl- флюорит, py- пирит, ba- барит, wu- вульфенит, cb - колумбит.

Результаты исследования флюидных включений показали (таб.1), что температуры гомогенизации ФВ в берилле варьируют в интервале от 191 до 265 °С. Рудообразующие растворы характеризуются относительно слабой соленостью 5,9-8.6 экв. NaCl, главные солевые компоненты представлены хлоридами кальция с примесью хлоридов натрия, калия, магния и железа. Наличие в растворах примеси магния способствует разложению берилла до фенакита. В составе газовой фазы идентифицирована углекислота. Температура гомогенизации флюидных включений из кварца оказалась выше температуры гомогенизации флюидных включений из берилла и варьируется от 250 до

281 ºС. Температуры эвтектики соответствуют – 37 до – 35 °С, это говорит о том, что главные солевые системы представлены $NaCl$-$FeCl_2$-H2O, $FeCl_3$-H_2O.

Таблица 1. *Сводная таблица результатов микротермометрических исследований.*

Минерал-хозяин	Тип ФВ	Т. Гом.	Т. Пл. льда	Т. Эвт.	Соленость экв. NaCl мас. %	Тип солевой системы
Кварц (богатые кв.-Мо. прожилки)	Гом-ные	≥+314…216	-8.9…-3.9	-49.8…-55 …-37…-38	6.3-12.7	$CaCl_2$-H_2O $CaCl_2$-$NaCl$-H_2O $CaCl_2$-$MgCl_2$-H_2O $CaCl_2$-KCl-H_2O $NaCl$-$FeCl_2$-H_2O $MgCl_2$-KCl-H_2O $FeCl_3$-H_2O
Кварц (бедные кв.-Мо. прожилки)	гом-ные	≥+312…186	-6…-4	-49.5…-53.5..-36.1 …-39	6.5-9.2	$CaCl_2$-H_2O $CaCl_2$-$NaCl$-H_2O $CaCl_2$-$MgCl_2$-H_2O $CaCl_2$-KCl-H_2O $NaCl$-$FeCl_2$-H_2O $MgCl_2$-KCl-H_2O $FeCl_3$-H_2O
Берилл (кварц-берил. прожилки)	Гом-ные	≥191…265	-3.6…-5.5	-55…-50…-42..-37	5,9-8.6	$CaCl_2$-$NaCl_2$-H_2O $CaCl_2$-KCl-H_2O $CaCl$-H_2O $MgCl_2$-KCl-H_2O $FeCl_3$-H_2O
Кварц (кварц-берил. прожилки)	Гом-ные	250…281	-	-37…-35	-	$MgCl_2$-KCl-H_2O, $MgCl$-$NaCl$-H_2O $NaCl$-$FeCl_2$-H_2O $FeCl_3$-H_2O

Примечание: *$T_{гом}$ – температура гомогенизации, $T_{пл.\ льда}$ – температура плавления льда, $T_{эвт}$ – температура эвтектики, - значения отсутствуют.*

Методом LA-ICP-MS с вскрытием индивидуальных ФВ были определены концентрации широкого спектра элементов: Li, Be, B, F, Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, Sn, La, Ce, Ta, W, Au, Pb, Th, U.Кварц-берилловые прожилки по содержанию бериллия и олово, имеют значения выше, по сравнению с кварц-молибденитовыми прожилками. По остальным же элементам значения схожи. По содержанию молибдена, кварц-берилловые прожилки занимают промежуточное положение между богатыми и бедными молибденитом прожилками.

Изотопные исследования показали (таб.2), что формирование прожилков происходило из магматогенных флюидов, следовательно, источником вещества являются те же рудогенерирующие граниты Первомайского штока.

Таблица 2. *Результаты изотопных анализов.*

Прожилки Veins	**№ п/п**	**Проба** Sample	**Минерал** Mineral	**$\delta^{18}O$ ‰ V-SMOW**	**Источник** Source
Кварц-берилловые Quartz-beryl	**1**	Пер(Per)-16-1	Кварц/Quartz	**6.0**	
	2	Пер(Per)-16-2	Берилл/Beryl	**5.4**	
	3	Пер(Per)-26-1	Кварц/Quartz	**6.7**	
	4	Пер(Per)-26-2	Берилл/Beryl	**5.5**	
	5	Пер(Per)-26-3	Мусковит/Muscovite	**4.3**	
	6	Пер(Per)-43-1	Кварц/Quartz	**7.1**	
	7	Пер(Per)-43-2	Берилл/Beryl	**6.2**	
	8	P-15-1	Кварц/Quartz	**6.5**	**Ripp et all, 2018**
	9	P-17-2	Берилл/Beryl	**5.3**	
Кварц-молибденитовые Quartz-molybdenite	**10**	P-15-4	Кварц/Quartz	**5.7**	
	11	P-15-5	Кварц/Quartz	**6.6**	
	12	Пер-22-1	Кварц/Quartz	**6.6**	
	13	Пер-22-2	Мусковит/Muscovite	**4.6**	

Установлено, что кварц из кварц-берилловых и кварц-молибденитовых прожилков имеет близкий изотопный состав кислорода. Значения $\delta^{18}O$ в кварце варьирует от 5.7 до 7.1‰. Самое низкое значение $\delta^{18}O$ имеет мусковит (4.3‰**)**. Значения в берилле немного ниже, чем в кварце ($\delta^{18}O$ = 5.3 – 6.2‰). Результаты предшественников согласуются с нашими данными.

Все полученные значения $\delta^{18}O$ соответствуют мантийному или магматогенному источнику (Рис.7), а разница в значениях изотопного состава кислорода между минеральными фазами соответствует изотопному фракционированию в системе кварц-берилл-мусковит (Chacko et al., 1996; Vho et al., 2019).

Попытки расчета температур равновесной кристаллизации по изотопному геотермометру показали слишком высокие значения температур, что позволило сделать вывод о том, что изотопное равновесие при формировании прожилков не было достигнуто.

Вопрос о формах переноса бериллия в гидротермальных растворах изучался многими исследователями. Более детально данный вопрос рассмотрен в работах Вуда. Был сделан вывод, что при температурах близких к 300ºС, хлоридные, гидроксидные и карбонатные комплексы Be не могут транспортировать большое количества бериллия. Особое значение, при таких температурах (выше 200 ºС), имеют смешанные фтор-карбонатные комплексы.

Присутствие флюорита в кварц-берилловых прожилках может свидетельствовать о высоком содержание фтора в рудообразующих растворах. Схожие данные были получены исследователями Ермаковского F-Be месторождения.

5. По теме проекта была написана одна статья «Минеральный состав и условия формирования кварц-бериллиевого оруденения Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье)». В настоящее время статья находится на стадии рецензирования в журнале «Руды и металлы». Предполагаемая дата выхода – декабрь 2022 г.

6. Одна статья на стадии рецензирования.

7. Прийто участие в ежегодной научной сессии ГИН СО РАН с докладом «Минеральный состав и условия образования кварц-бериллового оруденения Первомайского месторождения»**,** где заняла третье место среди молодых сотрудников и аспирантов.

8. Расходы: В ходе данного исследования было потрачено 24400 рублей (двадцать четыре тысячи четыреста рублей) на аналитические работы. Из которых:

- Исследование на электронном микроскопе – 2 часа по 200 рублей = 400 рублей.

- Изотопия кислорода – 16 проб по 1500 = 24000 рублей