

## Минеральный состав и условия формирования кварц-берилловой минерализации Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье)

Сажина Т. И., Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б.

Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена определению минерального состава, физико-химических параметров и источников вещества кварц-берилловой минерализации Первомайского месторождения, которая выделяется в качестве самостоятельной стадии минералообразования. Главными минералами являются кварц и берилл, впервые на Первомайском месторождении идентифицирован феноakit. Рудные минералы представлены молибденитом, пиритом и редкими зёрнами касситерита, халькопирита, рутила, айкинита, вульфенита, колумбита, монацита и ксенотима. Результаты исследования флюидных включений показали, что температуры гомогенизации флюидных включений в берилле варьируют в интервале от 265 до 191 °С. Рудообразующие растворы характеризуются низкой солёностью 5,9–8,6 экв. NaCl. Температуры гомогенизации флюидных включений в кварце соответствуют 281–250 °С. Данные по изотопному составу показывают участие в рудообразующем процессе метеорных вод.

**Ключевые слова:** Первомайское месторождение, кварц-берилловые прожилки, флюидные включения.

Для цитирования: Сажина Т. И., Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б. Минеральный состав и условия формирования кварц-берилловой минерализации Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье). Руды и металлы. 2023. № 1. С 25–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10003.

## The mineral composition and formation conditions of quartz-beryl mineralization of the Pervomaiskoe molybdenum deposit, Dzhida ore field, Southwestern Transbaikalian region

Sazhina T. I., Damdinova L. B., Damdinov B. B.

N. L. Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the RAS, Ulan-Ude, Russia

**Abstract.** The article is devoted to determination of the mineral composition, physicochemical parameters, and sources of the substance of quartz-beryl mineralization of the Pervomaiskoe ore deposit, that is distinguished as an independent stage of the mineral formation. The main minerals are quartz and beryl; phenakite has first been identified for the Pervomaiskoe deposit. Ore minerals are represented by molybdenite, pyrite, and rare grains of cassiterite, chalcopyrite, rutile, aikinite, wulfenite, columbite, monazite, and xenotime. Results of studying the fluid inclusions have showed that homogenization temperatures of the fluid inclusions in the beryl vary in the range from 265 to 191°C. The ore-forming solutions are characterized by a low salinity of 5.9–8.6 NaCl equiv. Homogenization temperatures of fluid inclusions in the quartz correspond to 281–250°C. Data on the isotopic composition show the participation of meteoric waters in the ore-forming process.

**Key words:** Pervomaiskoe ore deposit, quartz-beryl veinlets, fluid inclusions.

For citation: Sazhina T. I., Damdinova L. B., Damdinov B. B. The mineral composition and formation conditions of quartz-beryl mineralization of the Pervomaiskoe molybdenum deposit, Dzhida ore field, Southwestern Transbaikalian region. Ores and metals, 2023, № 1, pp. 25–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10003.



*Введение.* Джидинский рудный район, в состав которого входит Джидинское рудное поле, расположен на территории Западного Забайкалья и занимает обширную территорию между водоразделами Хамар-Дабана и Джидинского хребта общей площадью более 10 000 км<sup>2</sup> [1]. Многие учёные связывают W-Mo (Be) оруденение Джидинского рудного поля с наиболее молодым (позднемезозойским) этапом тектономагматической активизации вдоль глубинного Джидинского разлома, в ходе которого формировались гранитоиды гуджирского интрузивного комплекса [1, 10, 11]. Несмотря на многочисленные исследования и планомерные геологические съёмки, важные вопросы по флюидному режиму, *P-T* параметрам, газовой-солевому раствору, продуцирующим W-Mo (Be) оруденение, в настоящее время остаются не до конца решёнными и поэтому требуют дальнейшего подробного исследования. Ранее авторами статьи было изучено Первомайское молибденовое месторождение, которое считается самым ранним в ряду объектов Джидинского рудного поля [17], Инкурское штокверковое вольфрамовое месторождение [6], а также Холтосонское вольфрамовое месторождение [7]. В результате были выявлены некоторые особенности минерального состава и условия формирования молибденовых и вольфрамовых руд, уточнён изотопный возраст молибденового оруденения, получены концентрации металлов в рудообразующих растворах по методике, описанной в работе А. А. Боровикова [4]. Однако данные о минеральном составе и условиях образования кварц-бериллиевой минерализации, присутствующей на Первомайском молибденовом месторождении, практически отсутствуют. Кварц-берилловые прожилки образуют отдельную стадию при формировании рудной минерализации Джидинского рудного поля, но данному типу оруденения ранее не уделялось достаточного внимания из-за небольшого распространения и низкой рудопродуктивности, ведь месторождения рассматриваемого рудного поля представляли интерес как источники молибдена и вольфрама. В то же время для уточнения эволюции Джидинской рудно-магматической системы необходимо детальное изучение состава, последова-

тельности и флюидного режима формирования всех типов рудной минерализации.

*Геологическое строение Первомайского месторождения.* В состав Джидинского рудного поля входят три крупнейших в регионе и стране месторождения – Первомайское (Mo), Инкурское и Холтосонское (W). В качестве примесных компонентов в рудах встречается ряд других полезных элементов, в том числе и бериллий (Be). В геологическом строении рудного поля принимают участие кембрийская хохюртовская осадочно-эффузивная свита, а также Модонкульский гранитоидный массив раннего палеозойского возраста, на контакте которого проходит субмеридиональный Джидинский глубинный разлом, и Первомайский шток гранит-порфиров, с которым связывается Mo-W оруденение.

Хохюртовская осадочно-эффузивная свита занимает восточную часть данного рудного поля и сложена песчаниками, сланцами, известняками, а также вулканитами основного и среднего составов.

Модонкульский гранитоидный интрузив представляет собой фрагмент крупного массива, вытянутого в северо-западном направлении и сложенного преимущественно кварцевыми диоритами и диоритами [11].

Первомайское молибденовое месторождение приурочено к северо-западной апикальной части одноимённого массива гранит-порфиров (рис. 1), имеющего форму лакколита с многочисленными апофизами. Площадь выхода массива на дневную поверхность составляет 0,35 км<sup>2</sup> [18]. В апикальной части отмечаются ксенолиты гранитов и граносиенитов верхнего палеозоя, а также кембрийских отложений кровли, свидетельствующие о небольшой глубине эрозионного среза. На Первомайском массиве, в большей степени в его эндоконтактной части, отмечаются апофизы и дайкообразные тела разнообразных гранитоидов. В становлении данного массива выделяются четыре интрузивные фазы: 1) фельзиты, фельзит-порфиры, слагающие апофизы и краевые части интрузива; 2) биотитовые граниты и гранит-порфиры основного тела и даек; 3) аплитовидные граниты; 4) аплиты и ап-



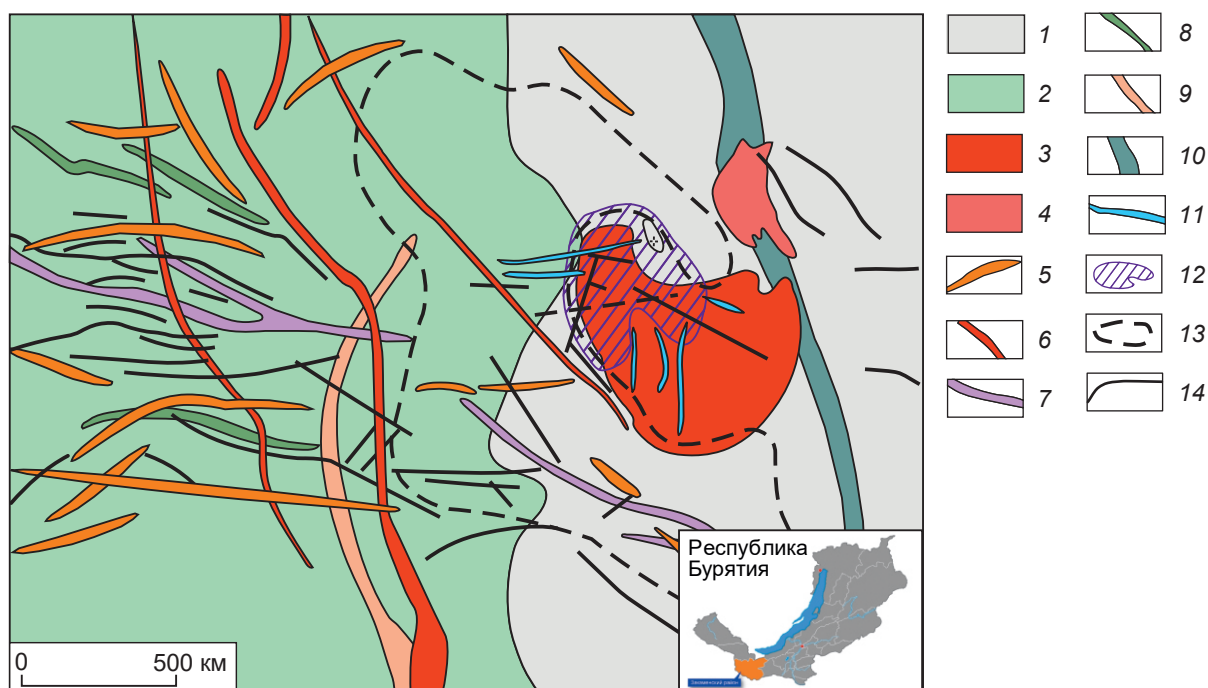


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Джидинского рудного поля, по [17]:

1 – хохюртовская свита: эффузивы, пирокласты, сланцы; массивы: 2 – Модонкульский (диориты, кварцевые диориты), 3 – Первомайский, 4 – Горкинский; дайки: 5 – серых сиенитов, 6 – гранит-порфиров, 7 – бостонитов, 8 – микродиоритов, 9 – плагιοгранитов; 10 – Джидинский глубинный разлом; 11 – кварц-молибденитовые жилы; 12 – Первомайский молибденовый штокверк; 13 – Инкурский вольфрамовый штокверк; 14 – кварц-сульфидно-гюбнеритовые жилы [8]; на врезке географическое положение рудного поля

Fig. 1. Schematic geological map of the Dzhida ore field, after [17]:

1 – Khokhyurt Formation (effusives, pyroclasts, shales); massifs: 2 – Modonkul (diorites, quartz diorites), 3 – Pervomaisky, 4 – Gorkinsky; dikes: 5 – gray syenites, 6 – granite-porphyrines, 7 – bostonites, 8 – microdiorites, 9 – plagiogranites; 10 – Dzhida deep-seated fault; 11 – quartz-molybdenite veins; 12 – Pervomaiskoe molybdenum stockwork; 13 – Inkur tungsten stockwork; 14 – quartz-sulfide-hubnerite veins [8]; in the inset, the geographic location of the ore field

лит-порфиры, образующие в апикальной части множество полого- и крутопадающих даек мощностью от 0,5 до 3–5 м [11].

Предшественниками полужены разные датировки возраста гранитов Первомайского массива. U-Pb датирование гранит-порфиров апикальной части массива, проведённое в ГИН СО РАН методом LA-ICP-MS, показало значение возраста гранитов  $123,5 \pm 1,5$  млн лет [12], Rb-Sr датирование –  $124,3 \pm 1,6$  [13] и  $137 \pm 4,8$  млн лет [2]. Также Re-Os методом получены два модельных возраста молибденита  $118,5$  и  $122,4$  млн лет [18].

Оруденение на Первомайском молибденовом месторождении прожилково-вкрапленное, представлено сетью различно ориентированных, в большей степени маломощных, кварцевых, кварц-полевошпатовых прожилков и жил с вкрапленностью молибденита [11]. На месторождении наблюдаются как мелкие, так и мощные (до 1,0–1,5 м и более) кварцевые и кварц-полевошпатовые жилы с вкрапленностью молибденита протяжённостью до 100, иногда 250 м, имеющие субширотное и субмеридиональное, редко северо-западное и северо-восточное простирание. Самый большой

интерес с практической точки зрения представляет прожилковое оруденение с мощностью прожилков от 1 мм до 5 см, редко до 10–30 см, сопровождающихся зонами вкрапленных молибденовых руд непосредственно во вмещающих гранит-порфирах. Основную часть Первомайского штокверка составляют руды с содержанием Mo 0,1–0,15 %. Оруденение распространено весьма неравномерно, отмечаются окна пустых пород и обогащённые участки, распределение которых зависит от густоты прожилков и характера их минерализации [5].

Для штокверка характерно наличие многочисленных дорудных и внутриминерализованных даек аплитов, гранит-порфиров. Дайки серых сиенитов, кварцевых сиенитов и лейкократовых гранит-порфиров пересекают молибденитсодержащие прожилки [11].

*Фактический материал и методы исследования.* Исследуемый материал представлен образцами кварц-берилловых прожилков, а также вмещающих пород, из которых были изготовлены проанализированные шлифы, шлиф-кассеты, аншлифы и пластины, а также отобраны минералы для изотопных исследований.

Для определения минералого-петрографического состава прожилков использовались методы оптической микроскопии на поляризационном микроскопе OLYMPUS BX-51 с цифровой фотокамерой MicroPublisher 3.3 RTV. Химический состав минералов определён Е. В. Ходыревой и кандидатом геолого-минералогических наук С. В. Канакиным в ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Дубрецова СО РАН (г. Улан-Удэ) методом рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA-Energy 350. Изотопный состав кислорода проанализирован В. Ф. Посоховым в ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Дубрецова СО РАН (г. Улан-Удэ).

Для определения физико-химических условий формирования кварц-бериллиевого оруденения были изучены наиболее пригодные для исследования первичные флюидные включения (ФВ) из зёрен кварца и берилла ме-

тодами термометрии и криометрии. Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз и гомогенизации сжиженных газов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до +600 °С. Стандартная аппаратная ошибка измерений составляет  $\pm 0,1$  в отрицательной и  $\pm 5$  °С в положительной областях температур.

*Результаты и обсуждение. Минеральный состав кварц-берилловых прожилков.* Кварц-берилловые прожилки распространены в эндо- и экзоконтактах Первомайского штока и пересекают кварц-молибденитовые прожилки [10], что свидетельствует об их более позднем образовании.

Породы, вмещающие оруденение, представляют собой гранит-порфиры, имеющие относительно выдержанный состав (рис. 2). Основная масса гранит-порфиров – мелкозернистая, состоит из мелких зёрен (до 1 мм) калиевого полевого шпата, кварца, плагиоклаза, а также биотита и мусковита. Порфировые вкрапленники достаточно равномерно распределены в основной массе, их размер варьирует от 2 до 5 мм. Вкрапленники представлены кварцем, калиевым полевым шпатом и реже плагиоклазом (см. рис. 2, а). Кроме того, отмечается редкая вкрапленность (см. рис. 2, b) (1–2 %) молибденита, пирита, флюорита (около 2 %) и апатита (< 1 %). В целом структура пород гипидиоморфнозернистая, реже отмечается пойкилитовая структура. Молибденовая минерализация Первомайского месторождения в основном сосредоточена в кварц-молибденитовых прожилках (рис. 3, с, d, e), обрамлённых зонами вкрапленной молибденитовой минерализации в гранит-порфирах.

Кварц-берилловые прожилки, как правило, сложены кварцем, шестоватыми, удлинённо-призматическими кристаллами бледно-зелёного (см. рис. 3, h), голубоватого берилла, зёрнами полевого шпата, реже встречается светлая слюда (мусковит). В некоторых участках прожилков отмечается мелкочешуйчатая вкрапленность молибденита. Помимо этого, в от-



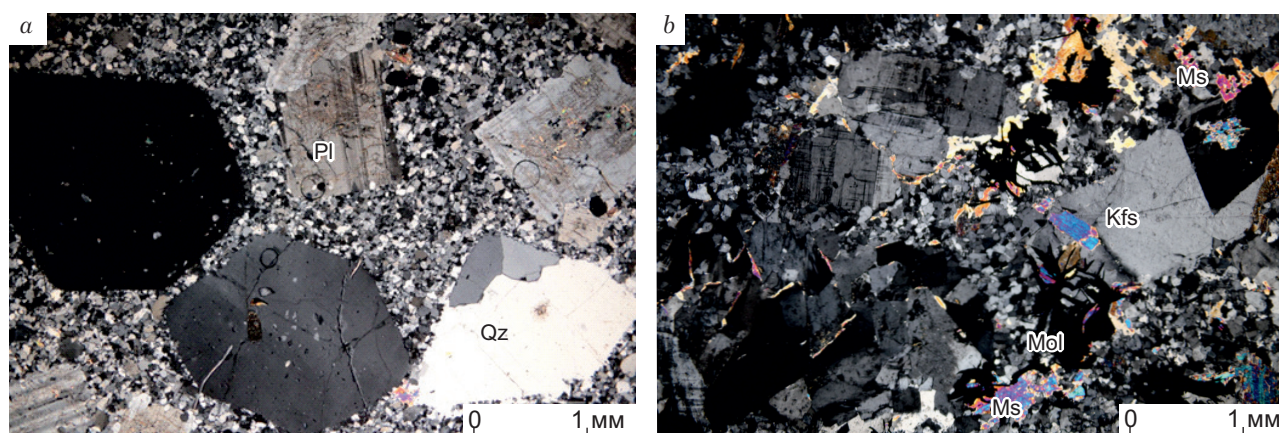


Рис. 2. Вмещающие гранит-порфиры:

*a* – гранит-порфир с вкрапленниками кварца, КПШ и плагиоклаза; *b* – гранит-порфир с вкрапленностью молибденита; Pl – плагиоклаз; Ms – мусковит; Kfs – КПШ; Mol – молибденит; Qz – кварц; Brl – берилл

Fig. 2. Host granite-porphyrines:

*a* – granite-porphyry with phenocrysts of quartz, K-feldspar, and plagioclase; *b* – granite-porphyry with disseminated molybdenite; Pl – plagioclase; Ms – muscovite; Kfs – K-feldspar; Mol – molybdenite; Qz – quartz; Brl – beryl

дельных образцах кварц-берилловых прожилков обнаружены редкие зёрна флюорита.

Кварц-берилловые прожилки имеют достаточно чёткие и резкие границы с вмещающими их породами, довольно часто кристаллы берилла растут от стенок прожилков. Это свидетельствует о том, что такие прожилки формировались путём выполнения трещин. Мощность прожилков варьирует от ~ 1 до 10 см (см. рис. 3, *f, g*).

Главный жильный минерал – кварц ( $\text{SiO}_2$ ), который составляет примерно 45 %, он образует неправильные изометрические зёрна с волнистым погасанием (рис. 4, *b*), размер которых достигает примерно 2 мм. Кварц является «сквозным» минералом, формирующимся на всех стадиях образования прожилков от ранней к поздней.

Берилл ( $\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ ) так же, как и кварц, является главным минералом. В прожилках распространён неравномерно, на его долю приходится до 20 об. %. Образует наиболее идиоморфные удлинённо-призматические, шестоватые кристаллы (см. рис. 4, *a*). Размер зёрен берилла в шлифах достигает  $5 \times 7$  мм, в образцах до 5 см, окраска бледно-зелёная (см. рис. 3, *h*).

Нами впервые на Первомайском месторождении был идентифицирован фенакит ( $\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$ ) (рис. 5, *a*), он образует единичные зёрна удлинённо-призматического облика размером до 2 мм по длинной оси, находится в тесной ассоциации с молибденитом и бериллом.

Также в качестве жильных минералов присутствует калиевый полевой шпат. Он образует изометрические зёрна размером до 3 мм, часто в тесном срастании с кварцем, а также наблюдается в виде мелких единичных включений в зёрнах мусковита.

Мусковит (до 10 %) ( $\text{KA}_{12}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ) образует пластинчатые, чешуйчатые зёрна зеленовато-белого цвета размером до 3 мм, чаще всего приурочен к зальбандовым частям прожилков. Нередко в прожилках отмечаются участки, где наблюдаются индукционные грани совместного роста мусковита и агрегатов молибденита. Мусковит характеризуется повышенным содержанием фтора 1,82–3,57 %.

Флюорит ( $\text{CaF}_2$ ) распространён неравномерно (до 5 %), образует агрегаты неправильной формы небольших размеров в интерстициях между зёрнами берилла, мусковита и кварца.





**Рис. 3. Фотографии Первомайского карьера и входящих в его состав гранитов и рудных прожилков:**

*a* – Первомайский карьер; *b* – граниты Первомайского месторождения; *c, d, e* – молибденитовые прожилки во вмещающих гранитах; *f, g* – кварц-берилловые прожилки; *h* – кварц-берилловый прожилок с зеленоватыми кристаллами берилла

**Fig. 3. Photos of the Pervomaiskoe open pit and its constituent granites and ore veinlets:**

*a* – Pervomaiskoe open pit; *b* – granites of the Pervomaiskoe deposit; *c, d, e* – molybdenite veinlets in the host granites; *f, g* – quartz-beryl veinlets; *h* – quartz-beryl veinlet with greenish beryl crystals

Барит ( $\text{BaSO}_4$ ) отмечается в интерстициях между зёрнами калиевого полевого шпата и берилла (см. рис. 5, *d*) в виде единичных удлинённых таблитчатых зёрен размером до 0,2 мм.

Главные сульфидные минералы представлены молибденитом, пиритом. Молибденит ( $\text{MoS}_2$ ) слагает от 5 до 10 % кварц-берилловых прожилков, образует листоватые, чешуйчатые агрегаты размером до 4 мм (см. рис. 4, *c*). В прожилках наблюдается как совместно с бериллом, так и в зальбандах в сростании с мусковитом.

Пирит ( $\text{FeS}_2$ ) – следующий по распространённости рудный минерал, составляет около

3–5 %. Наблюдается в виде хорошо огранённых кубических зёрен размером 0,1 × 0,2 мм (см. рис. 4, *d*), которые встречаются среди кварц-берилловых агрегатов, а также на контакте молибденита с бериллом (см. рис. 5, *c*).

Помимо этого, среди рудных минералов отмечаются следующие менее распространённые в данном типе прожилков: халькопирит, касситерит, рутил, колумбит, вульфенит, айкинит, а также ксенотим и монацит.

Халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ) встречается достаточно редко (< 1 %), в виде неправильных единичных зёрен жёлтого цвета размером 0,1 × 0,15 мм.



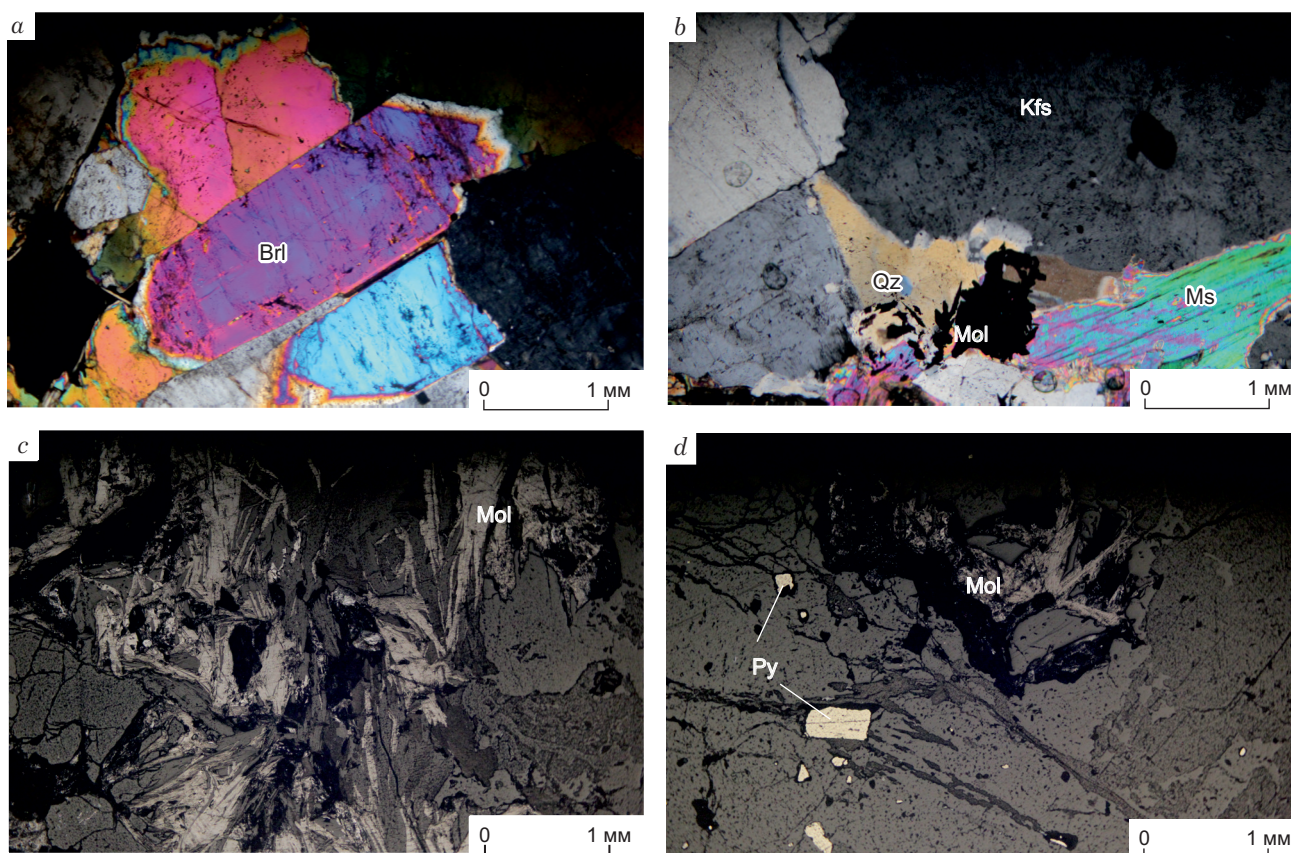


Рис. 4. Фотографии шлифов (верхний ряд) и аншлифов (нижний ряд) кварц-берилловых прожилков:

*a* – удлинённо-призматические кристаллы берилла; *b* – листоватые агрегаты молибденита в интерстициях кварца и мусковита; *c* – листоватый агрегат молибденита; *d* – кубические зёрна пирита и агрегаты молибденита среди нерудной массы; остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 4. Photos of thin sections (upper row) and polished sections (lower row) of quartz-beryl veinlets:

*a* – elongated prismatic crystals of beryl; *b* – foliated molybdenite aggregates in quartz and muscovite interstices; *c* – foliated molybdenite aggregate; *d* – cubic pyrite grains and molybdenite aggregates among gouge mass

Касситерит ( $\text{SnO}_2$ ) в аншлифах серый, анизотропный, образует изометрические, сдвоенные кристаллы, размер которых не превышает 0,3 мм.

Рутил ( $\text{TiO}_2$ ) наблюдается в виде редких зёрен, в шлифах имеет характерный красновато-бурый цвет и очень высокий рельеф. Он, как правило, образует вытянутые призматические кристаллы, размером не превышающие 0,3 мм. В качестве примеси имеет в своём составе, %: Fe – 0,46, Nb – 1,44, V – 1,1. Зёрна рутила разбиты сетью микротрещин, по которым в виде тонких прожилков развивается вольфрамит ( $\text{Pb}(\text{MoO}_4)$ ) и колумбит ( $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$ ,

слагающий выделения неправильной формы (см. рис. 5, *b*).

Айкинит ( $\text{PbCuBiS}_3$ ) отмечается в виде единичных (< 1 %) округлых включений в берилле размером менее 100 мкм.

Ксенотим ( $\text{YPO}_4$ ) образует короткопризматические кристаллы размером около 0,1 мм в межзерновых участках кварца и флюорита (см. рис. 5, *e*). В качестве примеси в ксенотиме присутствуют лантаноиды, %: Er – 2,37, Yb – 5,34, Dy – 4,01, Gd – 1,58.

Монацит ( $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})[\text{PO}_4]$ ) наблюдается в виде мелких единичных зёрен с неровными очертаниями, образуется по трещинкам



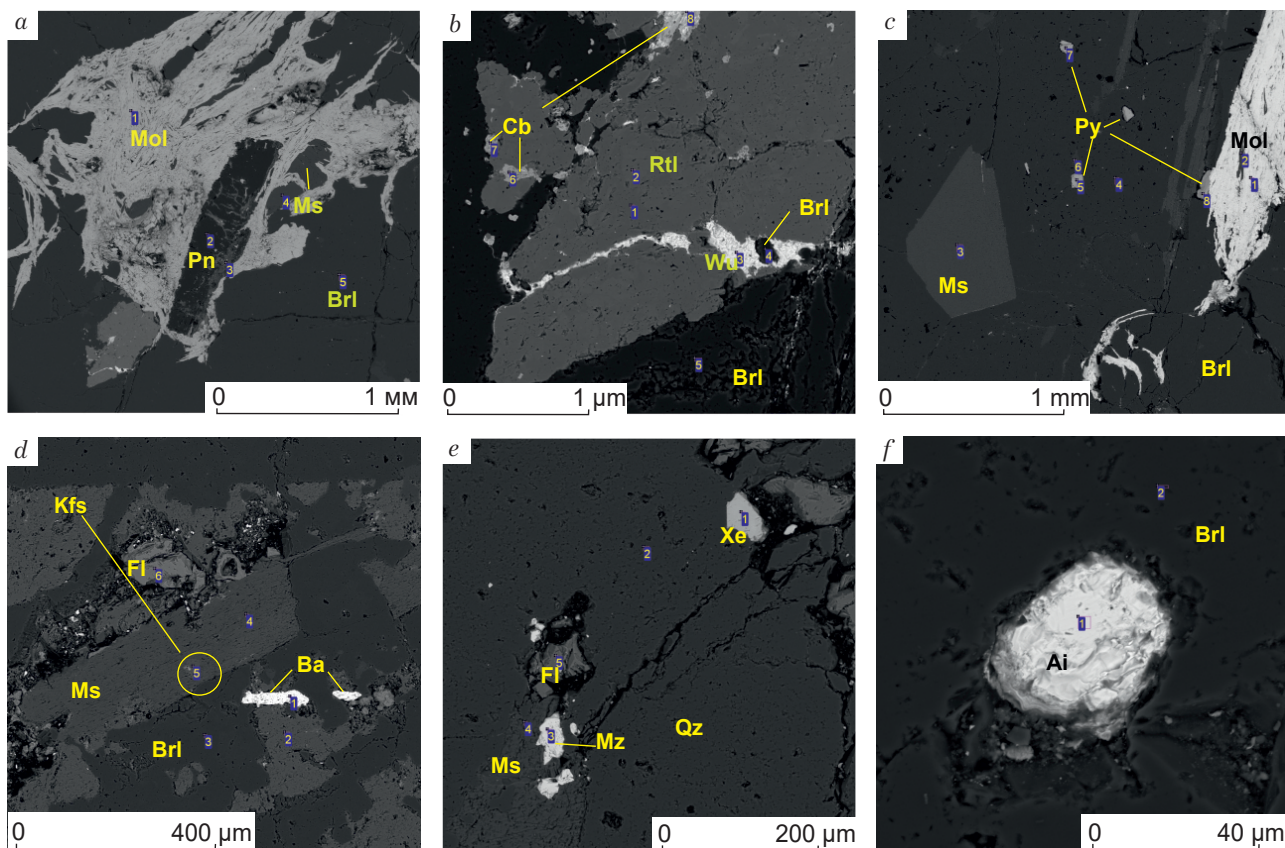


Рис. 5. Фотографии минералов из кварц-берилловых прожилков в обратно-рассеянных электронах:

Pn – фенакит; Ai – айкинит; Mz – монацит; Xe – ксенотим; Fl – флюорит; Py – пирит; Ba – барит; Wu – вульфенит; Cb – колумбит; Rtl – рутил; остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 5. Photos of minerals from quartz-beryl veinlets in back-scattered electrons:

Pn – phenakite; Ai – aikinite; Mz – monazite; Xe – xenotime; Fl – fluorite; Py – pyrite; Ba – barite; Wu – wulfenite; Cb – columbite; Rtl – rutile; for other conventional designations see fig. 2

в кварце, в тесной ассоциации с флюоритом и мусковитом (см. рис. 5, e).

*Изотопные исследования.* Для определения источников рудообразующих растворов были проведены изотопные исследования кислорода в кварце, берилле и мусковите. Результаты изотопного анализа минералов кварц-берилловых прожилков показаны в табл. 1. Для сравнения приведены литературные данные по изотопному составу кислорода в кварц-молибденитовых прожилках [23].

Установлено, что кварц из кварц-берилловых и кварц-молибденитовых прожилков имеет близкий изотопный состав кислорода. Зна-

чения  $\delta^{18}\text{O}$  в кварце варьируют от 5,7 до 7,1 ‰. Самый низкий показатель  $\delta^{18}\text{O}$  имеет мусковит (4,3 ‰); в берилле немного ниже, чем в кварце (5,3–6,2 ‰). Результаты предшественников согласуются с нашими данными (см. табл. 1). Разница в значениях изотопного состава кислорода между минеральными фазами соответствует изотопному фракционированию в системе кварц – берилл – мусковит [16, 24].

Расчёт температуры изотопного равновесия в паре кварц–мусковит был проведён по уравнению, опубликованному в работе [24]. Получено значение  $-461\text{ }^\circ\text{C}$ , которое интерпре-



Табл. 1. Результаты изотопных анализов

Table. 1. Results of isotopic analyzes

Прожилки	Минерал	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ V-SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ флюида
Кварц-берилловые	Кварц	6,0	3,0
	Берилл	5,4	5,9
	Кварц	6,7	3,7
	Берилл	5,5	6,0
	Мусковит	4,3	3,7
	Кварц	7,1	4,1
	Берилл	6,2	6,7
	Кварц	6,5	
	Берилл	5,3	
Кварц-молибденитовые [23]	Кварц	5,7	
	Кварц	6,6	

тируется как предполагаемая температура изотопного равновесия.

Расчёт изотопного состава равновесного флюида для данной температуры проведён по уравнениям [24]. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  флюида для разных образцов варьируют в интервале 3,0–4,1 ‰. Такой изотопный состав, скорее всего, свидетельствует о смешении магматического флюида с метеорными водами.

*Термобарогеохимические исследования.* Для определения условий минералообразования были изучены наиболее пригодные первичные флюидные включения в кварце и берилле. Все изученные первичные включения двухфазовые (жидкость > газ), в более крупных флюидных включениях отчётливо просматривается кайма жидкой углекислоты.

В зёрнах берилла исследованы достаточно крупные первичные двухфазные (газ < жидкость) ФВ гомогенного захвата, размер которых варьирует от первых микрон до ~ 80 мкм. Все изученные ФВ не содержат в своём составе твёрдой фазы, в большинстве случаев характеризуются удлинённой вытянутой формой по зонам роста минерала-хозяина (рис. 6, с, d).

Результаты термометрических и криометрических исследований флюидных включе-

ний показаны в табл. 2. Там же для сравнения приведены данные, полученные в ходе изучения кварц-молибденитовых прожилков.

Температура гомогенизации флюидных включений в берилле варьирует от 265 до 191 °С. Температуры эвтектики меняются в диапазоне от -55 до -38 °С, это свидетельствует о том, что главные солевые системы могут быть представлены хлоридами кальция, натрия, магния и калия [3, 14]. Разброс значений температур эвтектики может быть связан с тем, что даже в одном образце часть зёрен может быть более ранней, часть – более поздней. Соответственно за какой-то период времени раствор эволюционирует. Температуры плавления гидрата  $\text{CO}_2$  от 7,3 до 8,1, такие значения соответствуют солёности 5,23–2,5 мас. % экв. NaCl [19].

В зёрнах кварца, как правило, наблюдается большое количество вторичных флюидных включений. Однако для исследований были отобраны пригодные первичные флюидные включения, которые располагаются в зонах роста минерала-хозяина (т. е. захвачены в ходе его роста), окружены веществом минерала-хозяина и находятся на удалении от трещин. Размер таких включений варьирует от ~ 16 до 48 мкм (см. рис. 6, а, b). Для флюидных включений из кварца были определены температуры гомогенизации в пределах от 281 до 250 °С. Температуры эвтектики имеют значения от -38 до -36 °С, это говорит о том, что главные солевые системы могут быть представлены хлоридами магния, натрия, калия и железа. В интервале температур от ~ 7,2 до 8,8 происходит плавление гидрата  $\text{CO}_2$ , что соответствует солёности ~ 5,4–2,4 мас. % экв. NaCl [19]. Температура плавления углекислоты из флюидных включений в кварце соответствует -56,6. Гомогенизация углекислоты происходила в газовую фазу при температуре 30–31 °С.

Необходимо отметить, что признаки кипения флюидов не установлены. Следовательно, измеренные температуры гомогенизации флюидных включений могут быть намного ниже температур минералообразования вследствие влияния давления. На это указывают и высокие температуры, полученные при использовании изотопно-кислородного геотермометра.



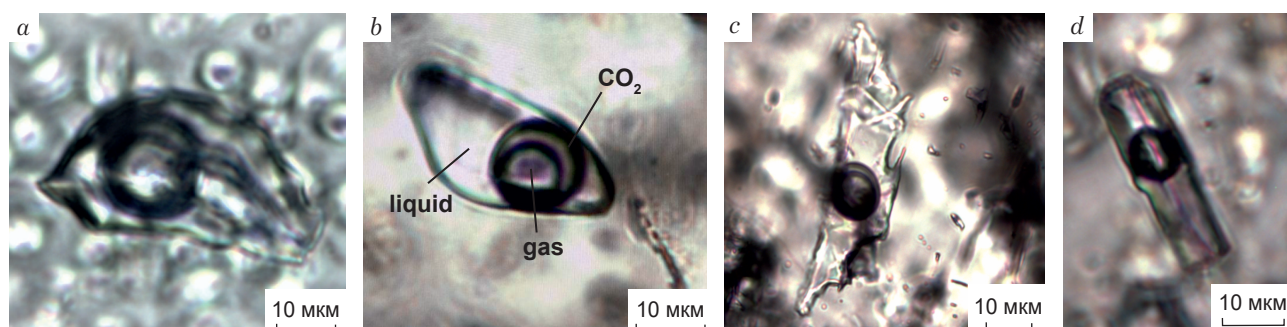


Рис. 6. Фотографии первичных флюидных включений:

*a, b* – в кварце; *c, d* – в берилле

Fig. 6. Photos of primary fluid inclusions:

*a, b* – in quartz; *c, d* – in beryl

Табл. 2. Сводная таблица результатов микротермометрических исследований

Table 2. Summary table of the results of microthermometric studies

Минерал-хозяин	$T_{\text{гом.}}$	$T_{\text{пл. льда}}$	$T_{\text{эвт.}}$	Солёность экв. NaCl, мас. %	Тип солевой системы
Кварц (богатые кварцево-молибденовые прожилки)	+314...216	-8,9...-3,9	-49,8...-55 ...-37...-38	6,3–12,7	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -NaCl-H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -MgCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O NaCl-FeCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O
Кварц (бедные кварцево-молибденовые прожилки)	+312...186	-6...-4	-49,5...-53,5, -36,1...-39	6,5–9,2	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -NaCl-H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -MgCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O NaCl-FeCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O
Берилл (кварц-берилловые прожилки)	191...265	7,3...8,1*	-55...-51...-38	*5,23–2,5	CaCl <sub>2</sub> -NaCl-H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O CaCl-H <sub>2</sub> O MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O
Кварц (кварц-берилловые прожилки)	250...281	7,2 ...8,8*	-38... -36	*5,4–2,4	MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O MgCl-NaCl-H <sub>2</sub> O NaCl-FeCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O

Примечание.  $T_{\text{гом.}}$  – температура гомогенизации,  $T_{\text{пл. льда}}$  – температура плавления льда, \* – плавления газогидрата;  $T_{\text{эвт.}}$  – температура эвтектики.





*Заключение.* Кварц-бериллиевое оруденение выделяется как самостоятельная, более поздняя по отношению к кварц-молибденитовому оруденению, стадия минералообразования. Главными жильными минералами являются кварц и берилл. Также среди жильных отмечаются калиевый полевой шпат, флюорит и мусковит. Впервые на Первомайском месторождении идентифицирован фенакит. Рудные минералы представлены молибденитом, пиритом и редкими зёрнами касситерита, халькопирита, рутила, айкинита, вульфенита, колумбита, монацита и ксенотима. 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, RЗЭ, P, Ba и др.

Результаты исследования флюидных включений показали, что температуры гомогенизации ФВ в берилле варьируют в интервале от 191 до 265 °С. Рудообразующие растворы характеризуются относительно низкой солёностью 5,4–2,5 экв. NaCl, главные солевые компоненты представлены хлоридами кальция с примесью хлоридов натрия, калия, магния и железа. Наличие в растворах примеси магния, возможно, может способствовать разложению берилла до фенакита [8]. В составе газовой фазы флюидных включений методом криометрии идентифицирована углекислота. Температура гомогенизации флюидных включений из кварца оказалась выше температуры гомогенизации флюидных включений из берилла и варьирует от 250 до 281 °С. Температуры эвтектики соответствуют -38 до -36 °С, это говорит о том, что главные солевые системы представлены хлоридами магния, калия, натрия и железа.

По сравнению с ранним кварц-молибденитовым оруденением стадия формирования кварц-берилловых прожилков характеризуется снижением температуры и солёности рудообразующих растворов.

Результаты изотопных исследований позволяют предполагать, что формирование бериллиевое оруденения протекало в условиях смешения магматогенных растворов и метеорных вод.

И таким образом, рудообразующие растворы, участвующие в формировании кварц-берилловой минерализации, характеризовались относительно низкой солёностью, присутствием в газовой фазе углекислоты с примесью других газов, а также хлоридным составом (хлориды кальция, натрия, калия, магния и железа). Присутствие фторсодержащих минералов свидетельствует о наличии соединений фтора в растворах. Минимальные температуры минералообразования (температуры гомогенизации) варьируют в диапазоне 191–281 °С.

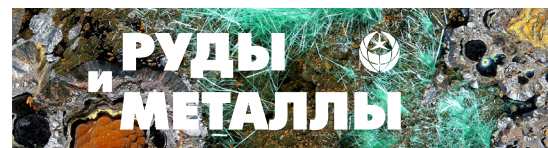
Вопрос о формах переноса бериллия в гидротермальных растворах изучался многими исследователями [9, 15, 20–22]. Более детально данный вопрос рассмотрен в работах С. А. Вуда [25]. Был сделан вывод, что при температурах, близких к 300 °С, хлоридные, гидроксидные и карбонатные комплексы не могут транспортировать большое количества бериллия. По экспериментальным данным [25], максимальный перенос бериллия осуществляется в смешанных фтор-карбонатных комплексах.

*Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект ГИН СО РАН № АААА-А21-121011390003-9).*

## Список литературы

1. Батурина Е. Е., Рупп Г. С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии). – М.: Наука, 1984. – 152 с.
2. Баянов В. Д. Позднемезозойская шошонит-латитовая серия Джидинского рудного района (Юго-Западное Забайкалье) // Доклады Академии наук. – 1994. – Т. 339, № 3. – С. 374–377.
3. Борисенко А. С. Изучение солевого состава газозо-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. – 1977. – Т. 18, № 8. – С. 16–27.

4. Боровиков А. А., Говвердовский В. А., Борисенко А. С., Брянский Н. В., Шабалин С. И. Состав и металлоносность рудообразующих флюидов Мо-W(Ве) месторождения Калгутинское (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 4. – С. 647–662.
5. Гордиенко И. В., Гороховский Д. В., Смирнова О. К., Ланцева В. С., Бадмацыренова Р. А., Орсов Д. А. Джидинский рудный район: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования, прогнозы и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. – 2018. – Т. 60, № 1. – С. 3–37.
6. Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) // Науки о Земле и недропользование. – 2020. – Т. 43, №3. – С. 290–306. – URL: <https://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>.
7. Дамдинова Л. Б., Сажина Т. И., Дамдинов Б. Б. Минералогия и условия формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения // Науки о Земле и недропользование. – 2022. – № 45 (1). – С. 34–49. – URL: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-34-49> (дата обращения: 07.02.2023).
8. Кляхин В. А., Лебедев А. С., Рагозина Т. П., Родионов А. Я. Физико-химические условия процессов минералообразования по теоритическим и экспериментальным данным. – Новосибирск, 1976. – С. 82–107.
9. Стельмачонок К. З., Ишков Ю. М. Металлоносность рудообразующих растворов Ермаковского бериллиевого месторождения // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С. 802–814.
10. Стельмачонок К. З. О близодновременном формировании односистемных прожилков в молибденитовом штокверковом рудном теле Джидинского месторождения (Забайкалье) // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 341, № 3. – С. 399–402.
11. Ходанович П. Ю., Смирнова О. К. Вольфрамоносные березиты и локальный прогноз оруденения. – Новосибирск : Наука, 1991. – 208 с.
12. Хубанов В. Б., Цыганков А. А. Периодичность эндогенных событий Монголо-Забайкальского сектора ЦАСП по данным U-Pb датирования цирконов из современных речных осадков // Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии: материалы V Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 45-летию Геологического института СО РАН (27.08.2018–31.08.2018, Улан-Удэ) / отв. ред. Е. В. Кислов. – Улан-Удэ : Бурятский государственный университет, 2018. – С. 380–382.
13. Чернышев И. В., Гольцман Ю. В., Баурова Э. Д., Иванова Г. Ф. Rb-Sr-геохронометрия процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Мо месторождение, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 360, № 4. – С. 537–540.
14. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications / eds. B. De Vivo, M. L. Frezzotti. – Blacksburg : Verginia Tech, 1994. – P. 117–130.
15. Burt D. M. Multisystems analysis of beryllium mineral stabilities: the system CaO-BeO-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-H<sub>2</sub>O // American Mineralogist. – 1978. – V. 63. – P. 664–676.
16. Chacko T., Hu X., Mayeda T. K., Clayton R. N., Goldsmith J. R. Oxygen isotope fractionation in muscovite, phlogopite and rutile // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1996. – V. 60, № 14. – P. 2595–2608.
17. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Tungsten Ores of the Dzhida W-Mo Ore Field (Southwestern Transbaikalia, Russia): Mineral Composition and Physical-Chemical Conditions of Formation // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – P. 725. – <https://doi.org/10.3390/min11070725> (дата обращения: 07.02.2023).
18. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Huang X.-W., Bryansky N. V., Khubanov V. B., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia) // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – P. 572. – URL: <https://doi.org/10.3390/min9100572> (дата обращения: 07.02.2023).
19. Darling R. S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – V. 55. – P. 3869–3871.
20. Franz G., Morteani G. The system BeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: hydrothermal investigation of the stability of



beryl and euclase in the range from 1 to 6 kb and 400 to 800 °C // *Neues Jahrbuch für Mineralogie (Abhandlungen)*. – 1981. – V. 140. – P. 273–299.

21. Gilbert R. A., Garrett A. B. The equilibria of the metastable crystalline form of beryllium hydroxide,  $\text{Be}(\text{OH})_2$  in hydrochloric acid, perchloric acid and sodium hydroxide solutions at 25 °C // *Journal of the American Chemical Society*. – 1956. – V. 78. – P. 5501–5505.
22. Hemingway B. S., Barton M. D., Robie R. A., Haselton H. T. Heat capacities and thermodynamic functions for beryl,  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ , phenakite,  $\text{Be}_2\text{SiO}_4$ , euclase,  $\text{BeAlSiO}_6$ , bertrandite,  $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ , and chrysoberyl,  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$  // *American Mineralogist*. – 1986. – V. 71. – P. 557–568.

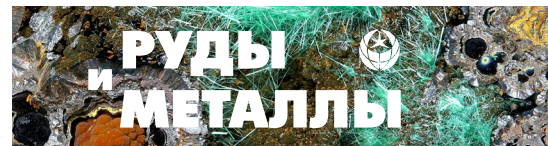
23. Ripp G. S., Smirnova O. K., Izbrodin I. A., Lastochkin E. I., Rampilov M. O., Posokhov V. F. An Isotope Study of the Dzhida Mo-W Ore Field (Western Transbaikalia, Russia). – *Minerals*. – 2018. – № 8. – P. 546.
24. Vho A., Lanari P., Rubatto D. An internally-consistent database for oxygen isotope fractionation between minerals // *Journal of petrology*. – 2019. – V. 60, № 11. – P. 2101–2130.
25. Wood S. A. Theoretical prediction of speciation and solubility of beryllium in hydrothermal solutions to 300 °C at saturated vapor pressure: Application to bertrandite/phenakite deposits // *Ore geology reviews*. – 1992. – V. 7. – P. 249–278.

## References

1. Baturina E. E., Ripp G. S. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии) [Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia (the main features of metallogeny and geochemistry)], Moscow, Nauka Publ., 1984, 152 p.
2. Bayanov V. D. Позднемезозойская шoshонит-латитовая серия Дзхидинского рудного района (Юго-Западное Забайкалье) [Late Mesozoic shoshonite-lattite series of the Dzhidinsky ore district (South-Western Transbaikalia)], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1994, V. 339, No 3, pp. 374–377. (In Russ.).
3. Borisenko A. S. Изучение солевого состава газозидких включений в минералах методом криометрии [Studying the salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by cryometry], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1977, V. 18, No 8, pp. 16–27. (In Russ.).
4. Borovikov A. A., Goverdovskii V. A., Borisenko A. S., Bryanskii N. V., Shabalin S. I. Состав и металлонность рудообразующих флюидов Мо-В(Ве) месторождения Калгутинское (Горный Алтай) [Composition and metallicity of ore-forming fluids Mo-W(Ve) of the Kalgutinskoye deposit (Gorny Altai)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2016, V. 57, No 4, pp. 647–662. (In Russ.).
5. Gordienko I. V., Gorokhovskii D. V., Smirnova O. K., Lantseva V. S., Badmatsyrenova R. A., Orsoev D. A. Dzhidinskii rudnyi raion: geologicheskoe stroenie, strukturno-metallogenicheskoe raionirovanie, geneticheskie tipy rudnykh mestorozhdenii, geodinamicheskie usloviya ikh obrazovaniya, prognozy i perspektivy osvoeniya [Dzhidinsky ore district: geological structure, structural and metallogenic zoning, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecasts and prospects of development], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2018, V. 60, No 1, pp. 3–37. (In Russ.).
6. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Дзхидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) [Mineral composition and conditions of ore formation of the Inkursky tungsten deposit (Dzhidinskoye ore field, South-Western Transbaikalia)], *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie [Earth Sciences and subsoil use]*, 2020, V. 43, No 3, pp. 290–306, available at: <https://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306> (Accessed: 07.02.2023).
7. Damdinova L. B., Sazhina T. I., Damdinov B. B. Минералогия и условия формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения [Mineralogy and conditions of ore formation of the Holtoson tungsten deposit], *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie [Earth Sciences and subsoil use]*, 2022, No 45 (1), pp. 34–49, available at: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-34-49> (Accessed: 07.02.2023).



8. Klyakhin V. A., Lebedev A. S., Ragozina T. P., Rodionov A. Ya. Fiziko-khimicheskie usloviya protsessov mineraloobrazovaniya po teoricheskim i eksperimental'nym dannym [Physico-chemical conditions of mineral formation processes according to theoretical and experimental data], Novosibirsk, 1976, pp. 82–107.
9. Stel'machonok K. Z., Ishkov Yu. M. Metallonosnost' rudoobrazuyushchikh rastvorov Ermakovskogo berillievogo mestorozhdeniya [Metallicity of ore-forming solutions of the Ermakovsky beryllium deposit], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2001, V. 42, No 5, pp. 802–814. (In Russ.).
10. Stel'machonok K. Z. O blizodnovremennom formirovani i odnosistemnykh prozhil'kov v molibdenitovom shtokverkovom rudnom tele Dzhidinskogo mestorozhdeniya (Zabaikal'e) [On the near-simultaneous formation of single-system veins in the molybdenum stockwork ore body of the Dzhidinsky deposit (Transbaikalia)], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1995, V. 341, No 3, pp. 399–402. (In Russ.).
11. Khodanovich P. Yu., Smirnova O. K. Vol'framonosnye berezity i lokal'nyi prognoz orudneniya [Tungsten-bearing beryllites and local forecast of mineralization], Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, 208 p.
12. Khubanov V. B., Tsygankov A. A. Periodichnost' endogennykh sobytii Mongolo-Zabaikal'skogo sektora TsASP po dannym U-Pb datirovaniya tsirkonov iz sovremennykh rechnykh osadkov [Periodicity of endogenous events of the Mongol-Transbaikalian sector of the CAFB according to U-Pb dating of zircons from modern river sediments], *Geodinamika i minerageniya Severnoi i Tsentral'noi Azii: materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 45-letiyu Geologicheskogo instituta SO RAN (27.08.2018–31.08.2018, Ulan-Ude)* [Geodynamics and mineralogy of North and Central Asia: materials of the V All-Russian Scientific and practical conference dedicated to the 45th anniversary of the Geological Institute SB RAS (27.08.2018–31.08.2018, Ulan-Ude)], ed. E. V. Kislov, Ulan-Ude, Buryatskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2018, pp. 380–382.
13. Chernyshev I. V., Gol'tsman Yu. V., Bairova E. D., Ivanova G. F. Rb-Sr-geokhronometriya protsessov posledovatel'nogo formirovaniya granitov, greizenizatsii i gidrotermal'noi mineralizatsii: Dzhidinskoe W-Mo mestorozhdenie, Zapadnoe Zabaikal'e [Rb-Sr-geochronometry of the processes of sequential formation of granites, greisenization and hydrothermal mineralization: Dzhidinskoe W-Mo deposit, Western Transbaikalia], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1998, V. 360, No 4, pp. 537–540. (In Russ.).
14. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions, Fluid inclusions in minerals: methods and applications, eds. B. De Vivo, M. L. Frezzotti, Blacksburg, Virginia Tech Publ., 1994, pp. 117–130.
15. Burt D. M. Multisystems analysis of beryllium mineral stabilities: the system CaO-BeO-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-H<sub>2</sub>O, *American Mineralogist*, 1978, V. 63, pp. 664–676.
16. Chacko T., Hu X., Mayeda T. K., Clayton R. N., Goldsmith J. R. Oxygen isotope fractionation in muscovite, phlogopite and rutile, *Gechimica et Cosmochimica Acta*, 1996, V. 60, No 14, pp. 2595–2608.
17. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Tungsten Ores of the Dzhida W-Mo Ore Field (Southwestern Transbaikalia, Russia): Mineral Composition and Physical-Chemical Conditions of Formation, *Minerals*, 2021, V. 11, pp. 725, available at: <https://doi.org/10.3390/min11070725> (Accessed: 07.02.2023).
18. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Huang X.-W., Bryansky N. V., Khubanov V. B., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia), *Minerals*, 2019, V. 9, pp. 572, available at: <https://doi.org/10.3390/min9100572> (Accessed: 07.02.2023).
19. Darling R. S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, V. 55, pp. 3869–3871.
20. Franz G., Morteani G. The system BeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: hydrothermal investigation of the stability of beryl and euclase in the range from 1 to 6 kb and 400 to 800 °C, *Neues Jahrbuch für Mineralogie (Abhandlungen) [News Yearbook of Mineralogy (Treatisement)]*, 1981, V. 140, pp. 273–299. (In Germ.)
21. Gilbert R. A., Garrett A. B. The equilibria of the metastable crystalline form of beryllium hydroxide,



Be(OH)<sub>2</sub> in hydrochloric acid, perchloric acid and sodium hydroxide solutions at 25 °C, *Journal of the American Chemical Society*, 1956, V. 78, pp. 5501–5505.

22. Hemingway B. S., Barton M. D., Robie R. A., Haselton H. T. Heat capacities and thermodynamic functions for beryl, Be<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>, phenakite, Be<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, euclase, BeAlSiO<sub>6</sub>, bertrandite, Be<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(OH)<sub>2</sub>, and chrysoberyl, BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, *American Mineralogist*, 1986, V. 71, pp. 557–568.
23. Ripp G. S., Smirnova O. K., Izbrodin I. A., Lastochkin E. I., Rampilov M. O., Posokhov V. F. An Isotope Study of the Dzhida Mo-W Ore Field (Western Transbaikalia, Russia), *Minerals*, 2018, No 8, p. 546.
24. Vho A., Lanari P., Rubatto D. An internally-consistent database for oxygen isotope fractionation between minerals, *Journal of petrology*, 2019, V. 60, No 11, pp. 2101–2130.
25. Wood S. A. Theoretical prediction of speciation and solubility of beryllium in hydrothermal solutions to 300 °C at saturated vapor pressure: Application to bertrandite/phenakite deposits, *Ore geology reviews*, 1992, V. 7, pp. 249–278.

---

**Сажина Татьяна Ивановна** (Skuratova.tatyana@list.ru)

аспирант, инженер

**Дамдинова Людмила Борисовна**

кандидат геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник

**Дамдинов Булат Батуевич**

доктор геол.-минерал. наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией

ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия