

**Л. Б. Дамдинова<sup>1</sup>, Б. Б. Дамдинов<sup>1</sup>, Н. В. Брянский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ  
ludamdinova@mail.ru

<sup>2</sup> – Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск

**Состав растворов, сформировавших  
флюорит-лейкофан-мелинофан-эввидимитовые руды  
Ермаковского F-Be месторождения (Западное Забайкалье),  
по данным LA-ICP-MS**

Одной из основных проблем гидротермального рудообразования является определение концентраций металлов в законсервированных растворах. За последнее время в этом отношении наблюдается прогресс благодаря появлению нового метода вскрытия включений и анализа их содержимого методом LA-ICP-MS [Audetat et al., 1998 и др.].

Несмотря на развитие новейших методов анализа флюидных включений, в литературе отсутствуют аналитические оценки концентраций Be во включениях рудообразующих растворов месторождений, нет их и в последней сводке по этому элементу [Berrillium., 2002]. На данный момент известно лишь несколько работ [Стельмачонок, Ишков, 2001; Дамдинова, Рейф, 2004, 2005, 2008], которые касаются металлоносности рудообразующих растворов Ермаковского F-Be месторождения. В них методами термометрии и атомно-эмиссионной спектроскопии [Ишков, Рейф, 1990] индивидуальных флюидных включений (ФВ), вскрываемых лазерным импульсом (AES-LM), изучены солевой состав и металлоносность растворов, ответственных за формирование богатых фенакит-берtrandит-флюоритовых руд, а также кварц-флюоритовых и калишпат-флюоритовых пород с убогой Be минерализацией. К сожалению, в данных работах охвачены не все типы руд Ермаковского месторождения, не говоря уже о других месторождениях бериллия, поэтому трудно судить, насколько полученные значения  $C_{Be}$  и других металлов характерны для растворов других типов руд или месторождений Be.

Авторами настоящей работы оценены концентрации металлов во ФВ, отражающих состав рудообразующих флюидов, которые ответственны за формирование специфических флюорит-лейкофан-мелинофан-эввидимитовых руд XVIII рудной зоны Ермаковского месторождения.

Ермаковское F-Be месторождение расположено в Забайкалье и отличается самым высоким в мире средним содержанием BeO (1.3 %) в берtrandит-фенакитовых рудах [Генетические..., 1975; Куприянова и др., 2009]. Вместе с тем, Be оруденение на месторождении проявлено в разных формах, различающихся составом минералов и содержанием Be. Одним из примеров является малоизученная XVIII рудная зона, отличающаяся от главных (I и II) рудных зон специфическими флюорит-лейкофан-мелинофан-эввидимитовыми рудами, тогда как главными минералами Be в основных рудах месторождения являются фенакит и берtrandит.

XVIII рудная зона расположена на юго-западном фланге месторождения и приурочена к субмеридиональной трещинной зоне в непосредственном экзоконтакте штока субщелочных гранитов, вдоль которого проходят дайки сиенит-порфириров, порфириров и мезократовых эгириновых сиенитов. Вмещающие породы представлены скарнированными известняками и скарнами. Руды мелко-, среднезернистой

структуры светло-фиолетовой окраски с ячеистой и субграфической структурами сложены флюоритом (до 30–40 %), кальцитом, фенакитом ( $\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$ ), эвдидимитом ( $\text{NaBeSi}_3\text{O}_7(\text{OH})$ ), мелинофаном/лейкофаном ( $\text{Ca}_4\text{Na}_5\text{Be}_3 \times \text{Si}_6\text{O}_{20}\text{F}/\text{Ca}_3\text{Na}_3\text{Be}_3\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{F}_3$ ), альбитом; в небольших количествах присутствуют фторапатит, бавенит, гельвин, флогопит и др. Эвдидимит нередко образует крупные выделения пластинчато-листоватых сростков белого цвета (от 0.5 до 3–4 см). До изучения Ермаковского месторождения эвдидимит как весьма редкий минерал был известен лишь в высокощелочных (нефелиновых) пегматитах Норвегии, Гренландии и Хибин; мелинофан/лейкофан также характерны для щелочных пород. По среднему содержанию Be руды XVIII рудной зоны (0.9 мас. % BeO) несколько уступают главным рудным зонам (1.34 мас. % BeO), но являются самыми богатыми по содержанию флюорита до 29.7 мас. % [Куприянова и др., 2009].

Для изучения флюидных включений использован комплекс термобарогеохимических методов (термо- и криометрия индивидуальных ФВ), проведенный в ГИН СО РАН на микротермокамерах фирмы «Linkam». Вскрытие ФВ и анализ металлоносности рудообразующих растворов определены методом LA-ICP-MS на приборе Q ICP-MS NexION 300D с платформой лазерной абляции NWR-213 в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Этот метод позволяет одновременно определять концентрации широкого круга элементов в индивидуальных ФВ. Вскрытие флюидных включений происходило при следующих условиях: мощность плазмы 1350 Вт, поток охлаждающего и плазмообразующего газа 18 л/мин и 1 л/мин соответственно, поток несущего газа гелия «чистоты 4.5» 0.6 л/мин с последующим разбавлением аргоном 0.4 л/мин. Энергия лазера 0.024 мДж, частота 10 Гц, диаметр пучка 20 мкм. Измерялись 22 элемента со временем накопления по каждому 30 мс. При расчете использовались стандартные образцы NIST SRM 610, NIST SRM 612 [Jochum et al., 2011].

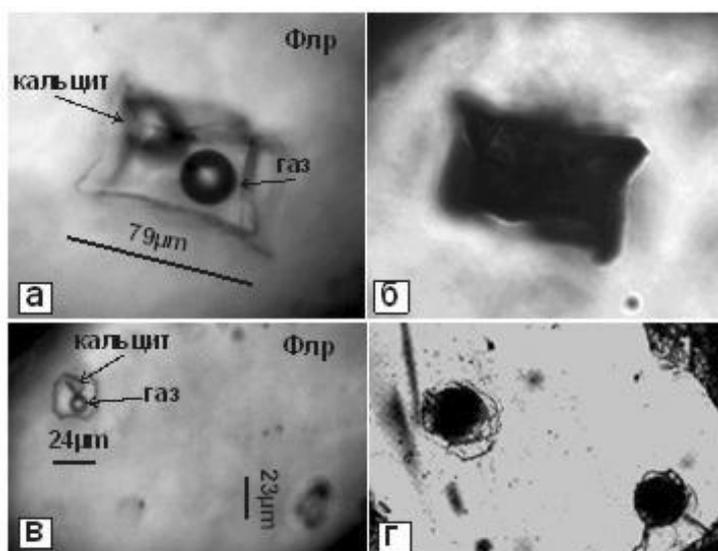


Рис. Первичные трехфазовые флюидные включения во флюорите:  
а, в – до вскрытия лазером; б, г – после вскрытия (видны кратеры на поверхности).

Были изучены первичные ФВ трехфазового состава (газ + водный раствор + кристалл кальцита) во флюорите (рис.), размеры таких включений составляют, в среднем, 10–30 мкм, весьма редко – 40–80 мкм. Интервал температур частичной гомогенизации варьирует от 130 до 320 °С, полной гомогенизации ФВ достичь не удалось, поскольку включения декрипитируют до растворения труднорастворимого кристалла кальцита. Температуры плавления льда варьируют от –2.5 до –7.8 °С, соответственно соленость растворов менялась от 4.1 до 11.5 мас. % (NaCl-экв.).

Для определения металлоносности рудообразующих растворов отбирались первичные относительно крупные (в среднем, 20–40 мкм) ФВ, которые располагались на глубине от поверхности пластины не более 30–40 мкм на удалении от шлейфов вторичных включений и твердых фаз. В проанализированных включениях определены концентрации Li, Be, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Mn, Fe, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, Sn, W, Pb (табл.).

Расчет содержаний элементов в растворах проводился с использованием внешнего стандарта NIST-610 и концентрации Na, рассчитанной из общей солености раствора и соотношения в нем основных солевых компонентов в качестве внутреннего стандарта.

Т а б л и ц а

**Концентрации металлов (г/кг раствора) во флюидных включениях по данным LA-ICP-MS**

№ пробы	Ep5 1	Ep5 2	Ep5 3a	Ep5 5	Ep2 1	Ep2 2	Ep5a 1	Ep5a 2a
$C_{\text{экв. NaCl}}$ мас. %	11.73	11.73	11.72	11.7	11.73	11.72	12.11	12.49
Li	0.0036	0.0194	0.0026	0.0140	0.0039	0.0150	0.0093	0.0026
Be	1.0404	0.0202	0.0002	0.0216	0.0005	н.п.о.	0.0032	н.п.о.
Na	35.50	38.06	33.72	34.65	35.60	36.39	35.80	45.15
Mg	0.1179	0.1277	0.0038	0.1079	0.0080	0.1018	0.0103	0.0362
Al	0.0245	0.1834	0.0003	0.0138	н.п.о.	0.0376	0.0100	0.0024
Si	19.8875	н.п.о.	0.2259	5.3361	0.3229	н.п.о.	1.5452	0.3741
Cl	71.3674	45.4871	44.0593	53.0183	45.8583	49.8751	50.2511	17.2514
K	10.2960	7.9571	12.3851	11.2727	14.4695	9.6167	11.8116	3.9512
Mn	1.8281	0.0264	0.0005	0.0050	0.0012	0.0073	0.0013	0.0003
Fe	н.п.о.	н.п.о.	0.0085	0.0520	0.0351	н.п.о.	н.п.о.	0.0187
Cu	0.0080	н.п.о.	0.0025	0.1060	0.0011	0.0120	0.0040	0.0003
Zn	н.п.о.	0.0236	0.00003	н.п.о.	0.0036	0.2708	0.0023	н.п.о.
Nb	0.0012	н.п.о.	н.п.о.	0.0117	н.п.о.	н.п.о.	0.0005	0.0002
Mo	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.0056	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Ag	0.0017	н.п.о.	0.0011	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.0003
Sn	0.0008	0.0088	н.п.о.	н.п.о.	0.0002	0.0042	н.п.о.	н.п.о.
W	0.0459	0.1222	0.0119	0.4673	0.0395	0.1915	0.0150	0.0069
Pb	0.0022	0.0092	н.п.о.	0.0042	0.0014	0.0118	н.п.о.	0.0007

Пр и м е ч а н и е . н.п.о. – ниже предела обнаружения;  $C_{\text{экв. NaCl}}$  – общая соленость, рассчитанная с учетом кристалла кальцита.

Начало абляции минерала-хозяина (флюорита) сопровождается возрастанием интенсивности Са, а вскрытие ФВ фиксируется по одновременному резкому повышению интенсивностей Na и Cl, а также некоторых других компонентов, входящих в состав ФВ.

В большинстве проанализированных ФВ  $C_{Be}$  оказалась выше предела обнаружения – от 0.0002 до 1.04 г/кг. Полученные концентрации Be характеризуются более низкими значениями по сравнению с полученными ранее результатами по растворам, сформировавшим богатые руды I зоны (0.18–3.82 г/кг раствора) и II зон (0.06–2.25 г/кг раствора) месторождения [Дамдинова, Рейф, 2004]. Этот вывод подтверждается данными по содержаниям Be в рудах разных рудных зон месторождения. Ранее установлено, что для образования промышленных месторождений Be, скорее всего, необходимы растворы с содержанием этого элемента не менее 0.1 г/кг.

Полученные результаты дают первые оценки уровней концентраций Be и ряда металлов в гидротермальных растворах, сформировавших флюорит-лейкофан-мелинофан-эвдидимитовые руды Ермаковского месторождения. Такая информация необходима для получения статистических данных о содержании Be и других элементов в растворах, а также для выявления ведущих факторов концентрирования Be и других металлов в гидротермальных месторождениях.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00339-а.*

## Литература

- Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия // Под ред. А. И. Гинзбурга. М.: Недра, 1975. 248 с.
- Дамдинова Л. Б., Рейф Ф. Г. Особенности формирования разнотипной прожилковой бериллиевой минерализации на Ермаковском F–Be месторождении (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 8. С. 979–991.
- Дамдинова Л. Б., Рейф Ф. Г. Тайниолит в рудах Ермаковского F–Be месторождения: закономерности распространения, условия формирования // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 2. С. 146–154.
- Дамдинова Л. Б., Рейф Ф. Г. Происхождение кварц-флюоритовой залежи с низким содержанием бериллия на Ермаковском месторождении богатых F-Be руд // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 11. С. 1084–1097.
- Ишков Ю. М., Рейф Ф. Г. Лазерно-спектральный анализ включений рудоносных флюидов в минералах. Новосибирск: Наука, 1990. 93 с..
- Куприянова И. И., Шпанов Е. П., Гальченко В. И. Ермаковское флюорит-бериллиевое месторождение (Западное Забайкалье, Россия) М.: ВИМС, 2009. 309 с.
- Стельмаченок К. З., Ишков Ю. М. Металлоносность рудообразующих растворов Ермаковского бериллиевого месторождения // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 5. С. 802–814.
- Audetat A., Gunther D., Heinrich C. A. Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: Insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions // Science. 1998. Vol. 279. P. 2091–2094.
- Berrillium: mineralogy, petrology, and geochemistry. Reviews in mineralogy and geochemistry // Editor: Edward S. Grew. University of Maine, Orono, Maine. Series Editor: Paul H. Ribbe. Virginia Polytechnic Institute and State University Blackburg, Virginia. Washington, DC. 2002. USA.
- Jochum K. P., Weis U., Stoll B., Kuzmin D., Yang Q., Raczek I., Jacob D. E., Stracke A., Birbaum K., Frick D. A., Günther D., Enzweiler J. Determination of reference value for NIST SRM 610-617 glasses following ISO guidelines // Geostandards and Geoanalytical Research. Vol. 35. № 4. 2011. P. 397–429.