

УДК 553.061.13:550.41:548.4

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БОГАТЫХ БЕРИЛЛИЕВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ СНЕЖНОЕ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

© 2015 г. Л. Б. Дамдинова\*, С. З. Смирнов\*\*, Б. Б. Дамдинов\*

\*Геологический институт СО РАН

670031, Улан-Удэ, Сахьяновой, ба

\*\*Институт геологии и минералогии СО РАН

630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3

Поступила в редакцию 22.01.2014 г.

Комплексом геологических, минералогических, петрографических и термобарогеохимических методов выявлены и изучены особенности строения и условий формирования бериллиевых руд, а также флюоритовых и флюорит-микроклиновых тел месторождения Снежное (Восточный Саян). Установлено, что основными механизмами формирования прожилковых и брекчиевых руд были процессы выполнения полостей (пустот и трещин), а не замещения малокальциевых рудовмещающих пород. Рудный парагенезис трех основных наиболее богатых типов руд состоит из практически единого набора минералов с различными соотношениями последних. Кальций и фтор, необходимые для образования флюорита в трех главных типах руд, привносились высокофтористыми околонейтральными растворами (I тип руд) и растворами повышенной щелочности (II, III типы) в виде комплексных соединений типа  $\text{Na}_2\text{CaF}_4^0$ ,  $\text{Ca}_2\text{Cl}_3\text{F}^0$  и др. Отложение бериллиевых минералов происходило в интервале от  $\geq 340$  до  $230^\circ\text{C}$  за счет охлаждения растворов и за счет связывания F во флюорит, что приводило к распаду фторокомплексов Be и интенсивному отложению минералов бериллия.

DOI: 10.7868/S0016777015060039

### ВВЕДЕНИЕ

Содержание полезного компонента, в частности, бериллия, в гидротермальных рудах эндогенных месторождений варьирует в довольно широких пределах. В одних случаях оно зависит от состава парагенезисов и/или химизма вмещающих пород, в других — от температуры минералообразования или особенностей состава рудообразующих растворов, гидродинамики потока флюидов и т.д. Однако информация об условиях переноса и отложения бериллия в гидротермальных растворах в мировой литературе весьма скудна и не охватывает всего многообразия типов гидротермальных месторождений бериллия.

Месторождения с флюорит-фенакит-бертрандитовой минерализацией в настоящее время являются наиболее богатыми по содержанию бериллия в руде. Одним из известных примеров является крупное Ермаковское F–Be-месторождение, выделяющееся среди аналогов самым высоким в мире средним содержанием  $\text{BeO} = 1.3\%$  (Kremenetsky *et al.*, 2000; Berrillium ..., 2002). Месторождение изучалось многими исследователями (Беус, 1960; Генетические типы ..., 1975; Куприянова и др., 2011; Гинзбург и др., 1965, 1969, 1979; Лыхин и др., 2001; Новикова и др., 1994, 1998; Стельмачонок,

Ишков, 2001; Рейф и др., 1999, 2003, 2005, 2008; Reuf, 2004; Berrillium ..., 2002; и др.).

Нами в результате изучения флюорит-бертрандит-фенакитовых руд Ермаковского месторождения установлено, что разные по содержанию бериллия рудные тела трех изученных ранее рудных зон (I, II и XII) формировались бериллиеносными растворами с высокой концентрацией Be (до 2–7 г/кг раствора), различающимися кислотностью-щелочностью и содержанием  $\text{CO}_2$  (Дамдинова 2005; Дамдинова, Рейф, 2004, 2005, 2008). Механизмы переноса и отложения бериллия определялись различными факторами: во флюидопроводящих трещинах бериллий осаждался из щелочных и околонейтральных растворов в результате уменьшения растворимости фторокомплексов с понижением температуры, а при образовании метасоматических апокарбонатных руд — в результате разрушения фторокомплексов бериллия из-за снижения активности F, обусловленного отложением флюорита ( $\text{CaF}_2$ ). Но, несмотря на большой спектр исследований Ермаковского F–Be-месторождения, другие объекты с подобной бериллиевой минерализацией практически не изучались ни у нас в стране, ни за рубежом.

В этом отношении особый интерес представляет территория Восточного Саяна, к которой приурочена одноименная бериллиеносная про-

Адрес для переписки: Л.Б. Дамдинова. E-mail: ludamdinova@mail.ru

винция (Куприянова, Шпанов, 2011). Одним из наиболее богатых по содержанию бериллия (среднее содержание  $\text{BeO} = 0.9\%$ ) в этом регионе является месторождение Снежное, относящееся к биотит-флюорит-фенакит-берилловому типу (Генетические типы ..., 1975). Результатам изучения состава руд и рудообразующих растворов, а также условиям формирования минерализации месторождения, реконструкции параметров рудообразующих процессов и выяснению роли различных факторов в формировании бериллиевого оруденения посвящено данное исследование.

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Для решения минералогических и петрографических задач использовались методы оптической микроскопии на поляризационном микроскопе OLYMPUS BX-51 с цифровой фотокамерой MicroPublisher 3.3 RTV.

Химический состав минералов определен С.В. Канакиным и Е.В. Ходыревой в ГИН СО РАН с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM-EDS) на установке LEO 1430 VP с энергодисперсионным спектрометром INCA-Energy 300.

Определение содержаний Be в рудах проведено в аналитической лаборатории ГИН СО РАН Т.И. Казанцевой атомно-эмиссионным спектральным анализом на анализаторе эмиссионных спектров "МАЭС".

Для исследования включений минералообразующих сред были использованы методы термометрии с помощью микротермокамеры Linkam THMSG-600 с диапазоном измерений температур в интервале от  $-196$  до  $+600^\circ\text{C}$  (ИГМ СО РАН). Состав газовой фазы и диагностика дочерних фаз во флюидных включениях определены методом КР-спектроскопии в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на спектрометре LabRam HR 800 с полупроводниковым детектором Horiba Scientific Symphony II и конфокальным микроскопом Olympus BX-41. В качестве возбуждающего использовано излучение Ar лазера CVI MellesGriot с длиной волны 514 нм и выходной мощностью 50–30 мВт.

Приблизительная оценка содержания солей во включениях (экв.  $\text{NaCl}$ ) рассчитывалась с помощью программы FLINCOR (Brown, 1989) по уравнению Brown&Lamb для системы  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ .

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

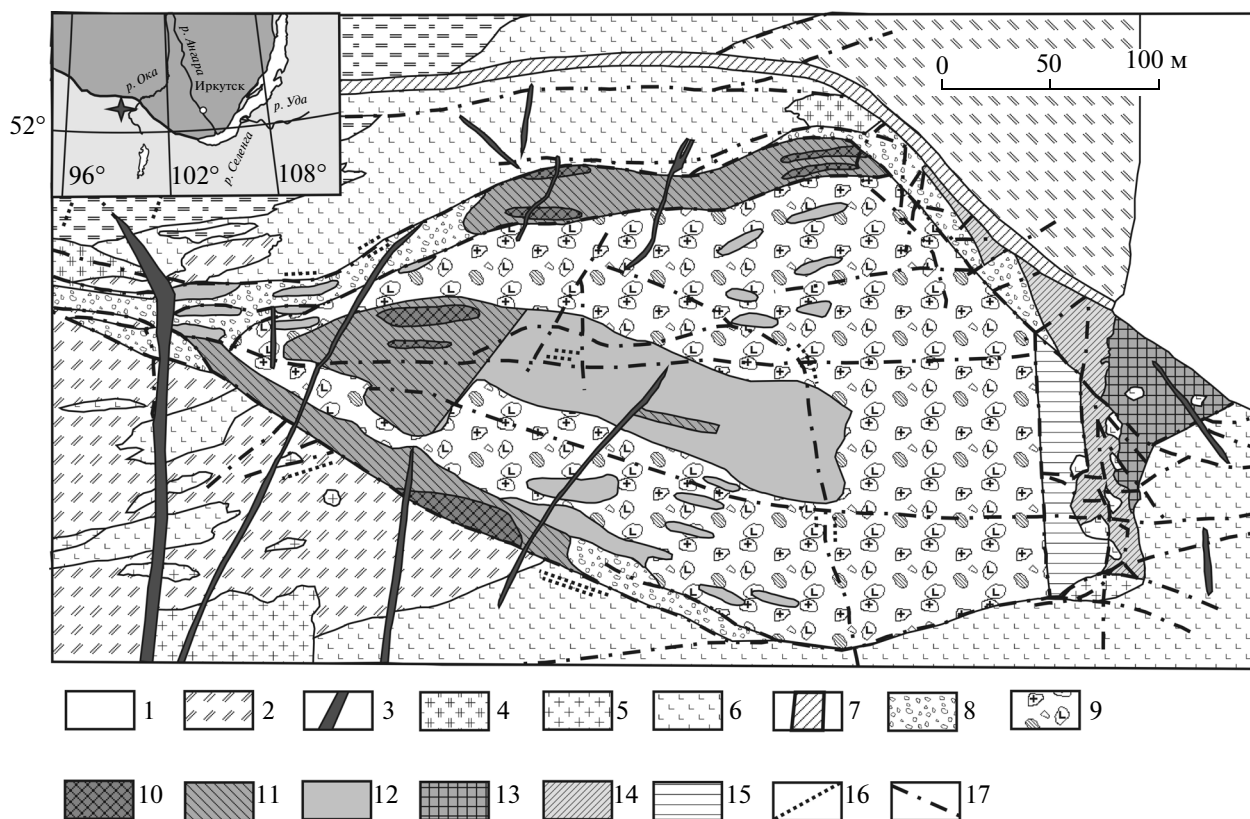
Месторождение Снежное было открыто в 1967 г. В.И. Серебренниковым и А.Ф. Нечкиным, которые при участии Е.Л. Емельянова подсчитали прогнозные ресурсы объекта, оцененного как крупный, с богатыми бериллиевыми и тантал-ниобие-

выми рудами. Это месторождение находится в труднодоступном горном районе на водоразделе рек Хойто-Ока и Тэргэтэй, географически расположенном в Окинском районе Республики Бурятия, на границе с Иркутской областью и Тувой. Район месторождения является высокогорным, с отметками от 2000 до 2700 м. Геологическое строение, вещественная структура и генетические особенности месторождения были изучены Т.Н. Шуригой и другими исследователями и описаны в работах (Генетические типы ..., 1975; Куприянова, Шпанов, 2011; Ярмолюк и др., 2011), по их данным, месторождение Снежное относится к слюдисто-флюорит-берилловой формации.

В геологическом строении месторождения (фиг. 1) принимают участие позднепротерозойские породы монгошинской свиты – амфиболовые, биотитовые и биотит-амфиболовые сланцы, амфиболиты с прослоями мраморизованных известняков, а также габбро-диориты таннуольского комплекса, метаморфизованные до амфиболитов, и небольшие тела аплитовидных щелочных гранитов огнитского комплекса. Наиболее поздними являются дайки диабазов.

Рудные зоны месторождения контролируются трещинными структурами и в плане образуют ромбовидный блок длиной 550 м и шириной 220 м, сложенный брекчиями сланцев, габбродиоритов и гранитоидов. В западной части блока отмечается участок эруптивной брекчии, в которой обломки мелкозернистых амфиболитов сцементированы лейкократовым агрегатом гранитного состава. В восточной части рудного поля присутствует тантал-ниобиевое оруденение, но оно пространственно разобщено с бериллиевым и приурочено к мелкозернистым альбититам, которые развиваются по гранитам, милонитам, амфиболитам.

Рудные тела с бериллиевой минерализацией представляют собой сложные минерализованные зоны дробления, локализованные в пределах крупных тектонических нарушений сбросового характера. Границы минерализованных зон четкие, внутреннее строение весьма неоднородно (Куприянова, Шпанов, 2011). Минерализованные зоны дробления с бериллиевым оруденением имеют протяженность первые сотни метров, мощность – первые десятки метров, вдоль этих зон широко распространены мелкообломочные брекчии (обломки до 10 см), которые в центральной части сменяются средне-крупнообломочными брекчиями (размер обломков до первых метров). Обломки представлены амфиболитами, биотитовыми слюдитами, мелко-, среднезернистыми плагиогранитами, часто имеют неправильную угловатую форму, реже расплывчатые края. Цемент брекчии преимущественно мелкозернистый, лейкократовый кварц-альбитовый и кварц-олигоклазовый с небольшим содержанием биотита.



Фиг. 1. Схема геологического строения флюорит-фенакит-бериллового месторождения Снежное (по В.Г. Окоркову, Е.Л. Емельянову и др.).

1, 2 – осадочные породы: коллювиально-моренные отложения, 2 – верхенепротерозойские монгошинской свиты; 3–6 – магматические породы: 3 – диабазы, диабазовые порфириды дарлинского комплекса, 4 – щелочные лейкограниты огнистого комплекса, вторая фаза, 5, 6 – таннуольский комплекс: 5 – серые биотитовые граниты, гранодиориты, аплиты третьей и второй фаз, 6 – габброиды первой фазы; 7 – зона милонитов и бластомилонитов; 8 – мелкообломочные брекчии; 9 – средне-крупнообломочные брекчии; 10 – богатые флюорит-берилл-фенакитовые руды; 11 – рядовые флюорит-берилловые и флюорит-фенакит-берилловые руды; 12 – бедные вкрапленные флюорит-берилловые руды; 13 – богатые Ta–Nb-руды; 14 – мелкообломочные брекчии с рядовой Ta–Nb-минерализацией; 15 – средне-крупнообломочные брекчии с бедной Ta–Nb-минерализацией; 16 – кварц-микроклиновые жилы; 17 – разломы.

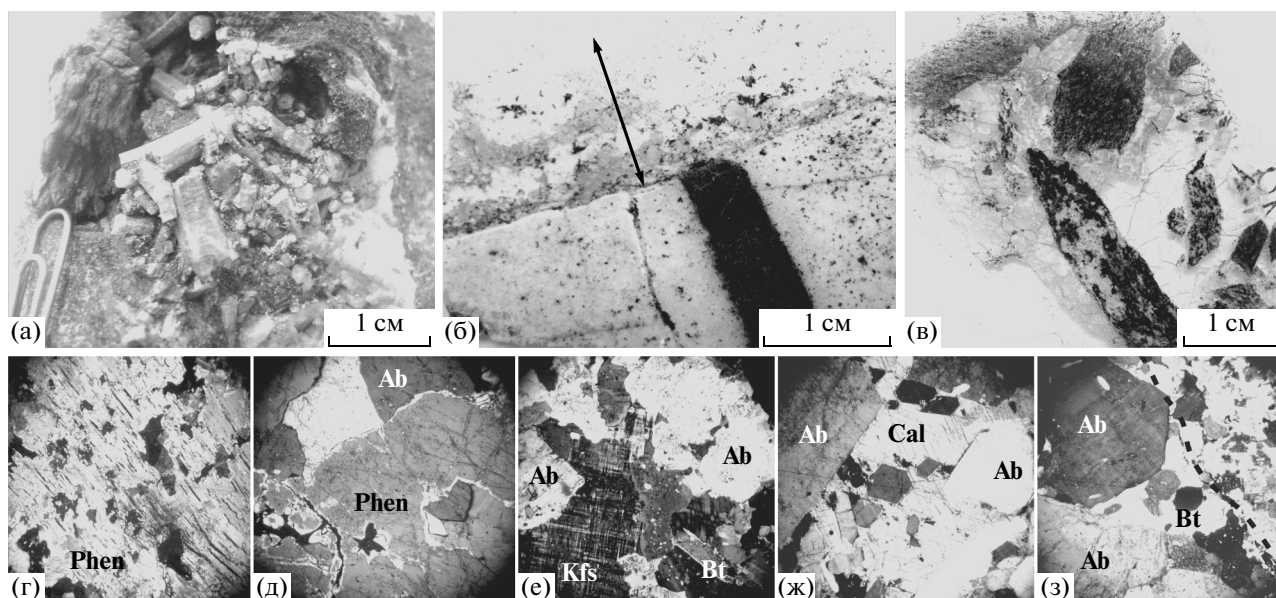
Максимальная концентрация бериллия приурочена к мелкообломочным брекчиям. Бериллиевые минералы входят в состав цемента брекчий, либо в состав рудных прожилков, развивающихся как по цементу, так и по обломкам вмещающих пород, и распределены весьма неравномерно. Основные минералы-концентраторы бериллия представлены фенакитом и бериллом, очень редко встречаются бертрандит и бавенит. Минералы-спутники представлены флюоритом, альбитом, КПШ (в различных соотношениях), в подчиненном количестве присутствуют кварц, слюды (биотит и мусковит), кальцит, апатит, титанит, кроме того, отмечаются сульфидные минералы – пирит, халькопирит, молибденит, галенит, сфалерит (Генетические типы ..., 1975).

Возраст оруденения, определенный по минеральной Rb-Sr-изохроне, составляет 306 млн лет, что позволило обосновать принадлежность ме-

сторождения к Восточно-Саянской редкометальной провинции (Ярмолюк и др., 2011).

#### ХАРАКТЕРИСТИКА БЕРИЛЛИЕВОГО ОРУДЕНЕНИЯ

В строении рудных тел, образующихся вдоль основных рудоконтролирующих сбросов, отмечается зональность, которая выражается в образовании на контактах рудных тел мономинеральной **флюоритовой зоны** мощностью 5–10 см, на 90–95% сложенной сплошным агрегатом флюорита темно-фиолетовой окраски, где отмечаются редкие зерна берилла и микроклина. Далее, по направлению внутрь рудного тела, флюоритовый агрегат сменяется **флюорит-микроклиновой зоной** мощностью до 15–20 см, которая содержит гнезда крупнокристаллического карбоната. В этих зонах отмечаются весьма редкие (до 3–5%) зеленовато-голубые кристаллы берилла чаще шестоватой



**Фиг. 2.** Три типа бериллиевых руд месторождения Снежное:

а – флюорит-берилл-фенакитовый тип (I тип), кристаллы свободного роста синего берилла, растущие в пустотах (фото образца); б – резкий контакт берилл-фенакитового прожилка (II тип, показан стрелками) мощностью 1.5 см с вмещающими сиенитами (фото пластины); в – фото полированной пластины брекчиевой микроклин-берилл-фенакитовой руды (III тип), темные обломки в рудном цементе; г–з – фотографии шлифов при скрещенных николях, при увеличении 20х: г – ячеистая структура фенакита в прожилке; д – зерно фенакита неправильной формы, наложенное на более идиоморфные зерна альбита; е – более поздний микроклин с характерной микроклиновой решеткой, заполняющий промежутки между зернами альбита; ж – поздний кальцит между идиоморфными кристаллами альбита; з – зерно биотита между более ранними зернами альбита на контакте прожилка с вмещающей породой (пунктир).

формы. Далее следуют непосредственно рудоносные брекчии (Генетические типы ..., 1975).

По данным Шуриги и Куприяновой (Генетические типы ..., 1975; Куприянова, Шпанов, 2011), на месторождении выделяется четыре главных типа руд:

- 1) Флюорит-берилл-фенакитовые;
- 2) Берилл-фенакитовые прожилковые;
- 3) Микроклин-берилл-фенакитовые руды;
- 4) Рядовые и бедные слюдисто-флюорит-фенакит-берилловые руды.

В данной работе изучены и описаны первые три наиболее богатых типа руд, а также флюоритовые и микроклин-флюоритовые тела, которые в дальнейшем будут условно называться V тип.

**Флюорит-берилл-фенакитовый тип (I тип)** характеризуется крупнозернистым брекчиевым строением, реже рудные агрегаты отмечаются в виде маломощных прожилков (менее 0.5–0.6 см). Содержание бериллия в этом типе 1.08 мас. % (табл. 2). По петрографическим данным и результатам электронной микроскопии, основные бериллиевые минералы представлены бериллом и фенакитом (табл. 1). Берилл (25–35%) слагает шестоватые четко ограниченные кристаллы яркосиней или голубой окраски в большинстве случаев размером до 0.5 см, реже до 1 см (фиг. 2). Для

фенакита (до 15–20%) характерны кристаллы молочно-белой окраски, участками отмечается краевое замещение таких кристаллов бериллом. Этот тип руд отличается высокими содержаниями флюорита (до 20–25%), который слагает изометричные зерна с ярко-выраженной фиолетовой окраской, имеющие округлые или угловатые формы, либо в виде зональных кубических кристаллов. Наиболее характерно неравномерное гнездообразное распределение флюорита в прожилке.

Поскольку брекчиевые руды формировались путем заполнения пустот между обломками вмещающих пород, то идиоморфизм кристаллов берилла, фенакита и флюорита, обусловленный свободным ростом в пустотах, предполагает их практически одновременный рост. Участками отмечаются редкие зерна альбита (табл. 1) и чешуйки мусковита (до 1–2%). В небольших количествах присутствуют наиболее поздние кальцит и кварц (до 1–2%), которые заполняют участки между более ранними кристаллами берилла, фенакита и флюорита.

**Берилл-фенакитовые (II тип)** прожилковые руды залегают в разных по составу породах (темноцветных слюдитах, амфиболитах, лейкократовых плагиогранитах) и являются наиболее богатыми по содержанию бериллия (до 4.3 мас. %, табл. 2).

Таблица 1. Химический состав минералов трех типов руд (мас. %)

	I тип						II тип						III тип											
	Brl	Phen	Cal	Ab	Ms		Cal	Brl	Kfs	Bt	Ab	Rds	Kfs	Brl	Bt	Cal	Bt	Brl	Kfs	Rds	Ab	Bt	Cal	Ab
	(6)	(3)	(6)	(2)	(3)		(4)	(4)	(3)	(3)	(5)	(2)	(4)	(7)	(6)	(6)	(6)	(7)	(4)	(2)	(5)	(6)	(6)	(3)
SiO <sub>2</sub>	67.37	52.97	—	69.32	49.40	—	—	68.46	64.52	41.57	68.67	—	—	66.01	38.40	—	—	65.17	—	—	—	—	—	67.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.59	—	—	19.82	26.57	—	—	16.75	18.29	12.47	19.00	—	—	15.19	13.12	—	—	18.07	—	—	—	—	—	18.80
FeO	1.41	—	—	—	5.27	—	—	1.39	—	14.87	—	—	—	2.06	19.37	—	—	—	—	17.19	—	—	—	—
MgO	0.98	—	—	—	2.77	—	—	0.93	—	15.86	—	—	—	1.12	10.82	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MnO	—	—	1.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40.29	—	—	—	—
CaO	—	—	53.24	0.24	—	—	56.3	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	12.87	—	—	—	0.14
Na <sub>2</sub> O	1.29	—	—	10.73	—	—	—	1.13	—	—	11.21	—	—	1.51	—	—	—	1.14	—	—	—	—	—	13.40
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	12.60	—	—	—	17.64	10.61	—	—	—	—	10.46	—	—	16.00	—	—	—	—	—	—
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.65	—	—	—	—	2.06	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.97	—	—	—	—	1.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Σ	87.64	52.97	54.76	100.1	96.61	—	56.3	88.66	100.45	99.00	98.99	70.35	100.38	85.89	95.45	53.45	85.89	100.38	70.35	98.99	95.45	53.45	99.70	

Примечание. Анализы выполнены С.В. Канакиным, Е.В. Ходыревой в ГИН СО РАН на электронном сканирующем микроскопе LEO-1430. Сумма для карбонатов (кальцит, родохрозит) дана без учета CO<sub>2</sub>, для минералов Be (берилл, фенакит) — без учета BeO, для слюд (биотит, мусковит) — без учета H<sub>2</sub>O. В скобках — количество анализов. Прочерк — элемент не определяется.

Здесь и далее: Kfs — калиевый полевой шпат, Ab — альбит, Cal — кальцит, Brl — берилл, Phen — фенакит, Bt — биотит, Ms — мусковит, Rds — родохрозит, Fl — флюорит, Qz — кварц.

**Таблица 2.** Обобщенные результаты термометрии и криометрии флюидных включений

Тип ФВ	Температура, °С		Состав ФВ, мас. %		Состав солевой системы	Ве
	$T_{эвт}$	$T_r, T_{чг}^{(*)}$	CO <sub>2</sub>	экв. NaCl		
I тип оруденения						
А	-21...21.5	+230–290	н.п.о	3.59–4.86	NaCl · 2H <sub>2</sub> O, KF · H <sub>2</sub> O NaCl–Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O	1.08
II тип оруденения						
Б	-35.7...–37	+262–310*	н.п.о	3.4–18.22	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> –K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O, MgCl <sub>2</sub> –NaCl–H <sub>2</sub> O, NaCl–FeCl <sub>2</sub> –H <sub>2</sub> O	3–4.3
III тип оруденения						
В	-23.8...22.9	+260–340	н.п.о	3.87–7.59	NaCl–KCl–H <sub>2</sub> O	0.15–0.73
Флюоритовое и микроклин-флюоритовое тела						
Г	-74...–74.5	+110–240**	н.п.о	≥23.18	LiCl–H <sub>2</sub> O	–

Примечание. Составы включений рассчитаны с помощью программы FLINCOR (Brown, 1989) по уравнениям Brown & Lamb для системы H<sub>2</sub>O–NaCl.

Ве – валовое содержание Ве в руде, мас. %.

\* – даны температуры частичной гомогенизации.

\*\* – показаны интервалы температур декрипитации ФВ; н.п.о. – ниже предела обнаружения методом криометрии.

Прожилки имеют резкие границы с вмещающими породами, их мощность в большинстве случаев достигает 1–2 см, околопрожилковые диффузионно-метасоматические оторочки визуально не различимы (фиг. 2). Для прожилков характерно наличие вытянутых шестоватых кристаллов альбита, нередко растущих от альбандов перпендикулярно стенкам, что может свидетельствовать о том, что прожилки сформировались путем выполнения трещин, поэтому последовательность выделения минералов в них устанавливалась по степени их идиоморфизма. Наиболее ранними в прожилках являются кристаллы альбита (фиг. 2д–з) шестоватой формы (до 20%), участками растущие от стенок прожилка к центральной части, калиевый полевой шпат (до 5%) присутствует в виде редких зерен неправильной ксеноморфной формы (фиг. 2е).

Содержание флюорита значительно ниже по сравнению с предыдущим типом (до 5–10%), окраска его варьирует от бледно- до темно-фиолетовой, распределение – гнездово-вкрапленное, неравномерное, участками агрегат флюорита заполняет всю мощность прожилка.

Берилл (40–50%) слагает либо вытянутые кристаллы характерной голубой окраски, либо агрегаты неправильной формы. Фенакит присутствует в подчиненном количестве (до 10–20%) и также образует агрегаты неправильной формы (фиг. 2д), либо агрегаты ячеистой формы (фиг. 2г). Формирование бериллиевых минералов происходило в промежуточную стадию, поскольку нередко они нарастают на более ранние кристаллы альбита (фиг. 2д).

К второстепенным минералам относятся биотит (до 1–2%) и кальцит (до 5%), которые, как правило, заполняют промежутки между другими минералами (фиг. 2ж, з) и являются наиболее поздними. В некоторых зернах кальцита отмечаются мелкие выделения Fe–Mn-карбоната неправильной формы, похожие на структуры распада твердого раствора системы кальцит–сидерит–родохрозит (табл. 1).

**Микроклин-берилл-фенакитовые руды (III тип)** распространены преимущественно на западном фланге месторождения и имеют брекчиевое строение, где крупные агрегаты минералов рудной ассоциации слагают цемент брекчий (фиг. 2в). Содержание бериллия в этих рудах достигает 0.73 мас. %, что несколько ниже, чем в двух предыдущих типах. Для этой ассоциации характерно высокое содержание калиевого полевого шпата (до 25–30%), который в основном слагает сплошную массу, иногда образует идиоморфные кристаллы свободного роста кубической формы. Агрегаты флюорита (до 10–15%) чаще темно-фиолетовой окраски обычно находятся в тесных срастаниях с калиевым полевым шпатом. Участками отмечаются зерна альбита (до 5%) и кальцита (до 5–10%). Также присутствуют редкие чешуйки биотита (до 5–10%) в промежутках между другими минералами. Рудный минерал преимущественно представлен бериллом зеленой иногда светло-желтой окраски, который часто образует скопления вытянутых шестоватых кристаллов, реже агрегаты неправильной формы.

Таким образом, все три перечисленных типа руд месторождения характеризуются практически единым набором минералов рудной ассоциации в различных соотношениях. Главные минералы руд: берилл, фенацит, флюорит, микроклин, альбит, биотит/мусковит, кальцит, кварц. К второстепенным отнесены: берtrandит, галенит, титанит, пирит, молибденит, апатит, магнетит.

По данным электронно-микроскопического изучения, существенных различий в химических составах главных минералов продуктивной ассоциации, в частности альбита и калиевого полевого шпата, не установлено (табл. 1). Кроме того, все проанализированные бериллы, характеризующие разные типы руд, имеют близкий состав элементов-примесей, в среднем:  $\text{Na}_2\text{O}$  — до 1.51 мас. %,  $\text{MgO}$  — до 1.12 мас. %,  $\text{FeO}$  — до 2.06 мас. %, исходя из которого минерал можно отнести к натриевому бериллу с повышенным содержанием Fe, Mg (табл. 1). Исключение составляют слюды. Для I типа руд характерно наличие мусковита, тогда как во II и III типах обнаружены биотиты, которые различаются по составу. Биотиты из II типа более магниезальные, но менее железистые по сравнению с III типом (табл. 1).

**Флюоритовая и микроклин-флюоритовая зоны (V тип)** формируются на контактах рудных зон, образующихся вдоль основных рудоконтролирующих сбросов. **Флюоритовая зона** имеет мощность 5–10 см и является практически мономинеральной, на 90–95% сложенной сплошными агрегатами флюорита насыщенной темно-фиолетовой окраски, среди которых отмечаются единичные зерна берилла и микроклина. Далее, по направлению внутрь рудного тела, флюоритовое тело сменяется **флюорит-микроклиновой зоной** мощностью до 15–20 см, которая кроме практически сплошного флюорита (до 80–85%) содержит редкие агрегаты микроклина (до 5–7%) и гнезда крупнокристаллического карбоната (до 5%). В этих зонах отмечаются весьма редкие (до 1–2%) зеленовато-голубые кристаллы берилла чаще шестоватой формы размером до 0.5–1 см и меньше.

## ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

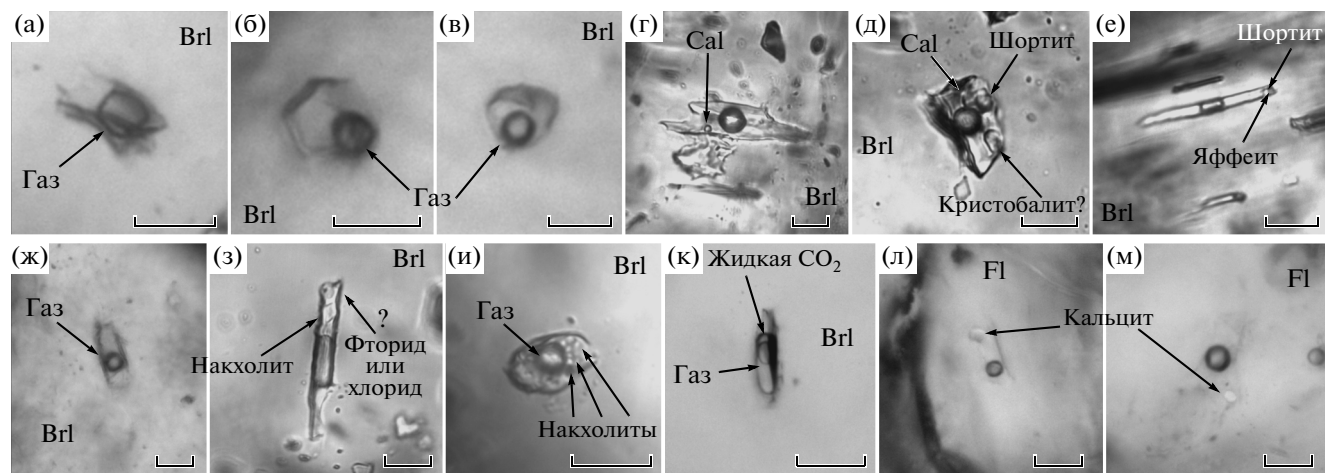
Практически все минералы рудной ассоциации месторождения содержат флюидные включения (ФВ), но только в берилле их размеры являются пригодными для термометрического изучения. В кварце также содержатся включения, но они имеют очень маленькие размеры (менее 1 мкм) и в основном вторичны. Как и в других минералах, большая часть ФВ в берилле группируется в уплотненные шлейфы (залеченные микротрещины) и относится к группе вторичных. К категории первичных включений отнесены относительно крупные (10–12 мкм,

крайне редко до 15–30 мкм) единичные ФВ, не принадлежащие ни к одному из наблюдаемых шлейфов вторичных включений. Нередко первичные включения пересекаются шлейфами мелких вторичных, либо отмечаются признаки их расщуровки, следовательно, они не являются представительными, и такие включения не изучались.

Во **флюорит-берилл-фенацитовых рудах (I тип)** были изучены ФВ в бериллах, где они достигают наиболее крупных размеров (до 10–15, реже 20 мкм), во флюорите крупных включений не обнаружено, поскольку сами зерна флюорита имеют небольшие размеры. Изученные первичные включения преимущественно имеют изометричную форму. Такие включения обычно содержат водный раствор, газовый пузырь без видимой жидкой  $\text{CO}_2$  ( $\text{Ж}_v$ ) и не содержат твердых фаз (фиг. 3а–в). В редких случаях в них отмечается небольшой кристаллик, идентифицированный как кальцит. По результатам КР-спектроскопии, в газовой фазе этих включений обнаружена  $\text{CO}_2$ , которая не фиксируется методом криометрии,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CH}_4$  не обнаружены. Температуры гомогенизации ФВ в разных зернах берилла варьируют в интервале от +230 до +290°C (табл. 2). Появление первой жидкости при оттаивании происходит при температурах от –21 до –21.5°C. Плавление льда происходит в диапазоне –2.2...–2.9°C. Соленость растворов этого типа (**L1**) варьирует от 3.6 до 4.9 мас. % в эквиваленте NaCl.

Признаков гетерогенизации растворов, сформировавших данный тип оруденения (в дальнейшем **L1**), не обнаружено, поэтому можно предполагать, что эти растворы были гомогенными.

В прожилковых **берилл-фенацитовых (II тип)** рудах наиболее широко распространены кристаллы берилла, содержащие первичные многофазовые включения изометричной (фиг. 3д), либо вытянутой формы (фиг. 3е), которые, как правило, содержат водный раствор, газовый пузырь без видимой каймы жидкой  $\text{CO}_2$ , а также один (фиг. 3г, е) или несколько кристаллов (фиг. 3д), в некоторых весьма редких включениях кристаллики отсутствуют (фиг. 3ж). Гораздо реже отмечаются первичные ФВ с крупными газовыми пузырями с широкой каймой жидкой  $\text{CO}_2$  (фиг. 3к), но к подобным ФВ обычно приурочены шлейфы мелких вторичных включений, поэтому они вряд ли являются представительными. Весьма редко в пределах одного зерна берилла присутствуют первичные существенно газовые и существенно водные включения небольших размеров (менее 5–6 мкм), их сингенетичность весьма трудно доказать, поскольку не отмечается четкой приуроченности к одной зоне роста кристалла. Присутствие первичных водных и водно-углекислотных включений в минералах может являться одним из признаков



**Фиг. 3.** Первичные флюидные включения в бериллах (а–к) и во флюоритах (л–м) из разных типов руд, а–в – I тип руд, г–ж, к – II тип руд, з–и – III тип руд, л–м – ФВ из флюоритового и микроклин-флюоритового тел:

а–в – двухфазовые ФВ без видимой Ж<sub>у</sub> и твердых фаз; г – ФВ с одним кристалликом кальцита; д – многофазовое ФВ с кристаллами кальцита, шортита, кристобалита; е – удлиненное ФВ с кристаллами шортита и яффеита; ж – двухфазовое ФВ без твердых фаз; з – ФВ с кристаллами накхолита и фторида/хлорида?; и – многофазовое ФВ с кристаллами накхолита; к – непредставительное ФВ с видимой каймой Ж<sub>у</sub>, рядом с которым рой мелких вторичных ФВ; л, м – ФВ во флюорите с единичными кристаллами кальцита. Длина масштабной линейки – 10 мкм.

гетерогенности растворов этого типа оруденения (в дальнейшем **L2**).

Изучение с помощью КР-спектроскопии многофазных включений из берилл-фенакитовых руд позволило идентифицировать твердые фазы, которые в большинстве случаев представлены анизотропным кристалликом кальцита (фиг. 3г), в некоторых ФВ отмечаются бикарбонаты Na и Ca – накхолит ( $\text{NaHCO}_3$ ), реже шортит ( $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$ ), также в одном случае был обнаружен кристобалит ( $\text{SiO}_2$ ) (фиг. 3д) (база данных КР-спектров RRUFF, <http://rruff.info/>). Кроме того, в одном из включений идентифицирован минерал яффеит –  $\text{Ca}_4[\text{Si}_3\text{O}_7](\text{OH})_6$  (фиг. 3е). В газовой фазе всех подобных ФВ, по данным КР-спектроскопии, установлена  $\text{CO}_2$ , в небольших количествах присутствует  $\text{N}_2$ , тогда как  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{S}$  не обнаружены.

Нагревание таких кристаллофлюидных включений приводит к частичному растворению твердых фаз ( $T_{\text{чр}}$ ), газовая фаза растворяется при 190–310°C, все твердые фазы, за исключением кальцита, растворяются при +193°C. Для включений, содержащих только кристаллик кальцита, определена температура частичной гомогенизации ( $T_{\text{чг}}$ ) от +262 до +310°C, поскольку ФВ декрипитируют до растворения кальцита. Температуры гомогенизации ( $T_1$ ) двухфазовых включений без твердых фаз в разных зернах берилла варьируют от +223 до +260°C (см. табл. 2), наибольший нагрев достигал +339°C, после которого ФВ декрипитируют.

При охлаждении этих включений первое плавление выпавших при замораживании твердых фаз

происходит в интервале –35.7...–37°C. Температура плавления льда в этих ФВ варьирует от –2 до –14.5°C, следовательно, концентрация солей во флюиде изменялась от 3.4 до 18.2 мас.% экв. NaCl.

**В микроклин-берилл-фенакитовых рудах (III тип)** также изучены первичные включения в бериллах, они представлены ФВ вытянутой (фиг. 3з) либо овальной формы (фиг. 3и). Такие включения, как правило, содержат водный раствор, газовый пузырь без видимой каймы Ж<sub>у</sub>, два кристалла (фиг. 3з), один из которых идентифицируется как накхолит, другой, по всей видимости, представлен фторидом либо хлоридом, поскольку КР-спектры этой минеральной фазы в базе данных (RRUFF, <http://rruff.info/>) отсутствуют (фиг. 3з). В некоторых включениях отмечается несколько мелких твердых фаз, наиболее крупные из которых представлены накхолитами (фиг. 3и), более мелкие определить не удалось из-за их малого размера. В газовой фазе этих ФВ, по данным КР-спектроскопии, присутствует  $\text{CO}_2$ , тогда как  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{S}$  не обнаружены. Температуры гомогенизации таких включений варьируют от +260 до 340°C, выше 340°C включения декрипитируют.

Температуры эвтектики варьируют в пределах –23.8...–22.9°C (см. табл. 2). В замороженных включениях четко наблюдается образование льда, плавление которого происходит в интервале от –2.3 до –4.8°C, соответственно, соленость рудообразующих растворов варьирует от 3.9 до 7.6 мас. % (экв. NaCl). Достоверных признаков гетерогенизации растворов этого типа (**L3**) не обнаружено.



Во флюоритовом и микроклин-флюоритовом (V тип) телах были изучены ФВ во флюорите, поскольку только в нем они достигают наиболее крупных размеров (до 15–20, реже 30 мкм). Первичные включения имеют преимущественно вытянутую форму (фиг. 3л, м). Эти включения обычно содержат водный раствор, газовый пузырь без видимой каймы жидкой  $\text{CO}_2$  ( $\text{Ж}_y$ ) и один кристаллик, который по результатам КР-спектроскопии идентифицирован как кальцит (фиг. 3л, м). В газовой фазе этих включений  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  не обнаружены, тогда как в некоторых включениях отмечается присутствие  $\text{CH}_4$ . Температуры гомогенизации таких включений достоверно не установлены, поскольку все они декрипитируют в интервале от +110 до +240°C, возможно, из-за присутствия в них метана. Судя по размерам пузыря в ФВ, температуры должны быть не менее +300...+350°C. Появление первой жидкости при оттаивании происходит при температуре –74°C, что наиболее соответствует температуре эвтектики растворов  $\text{LiCl}-\text{H}_2\text{O}$ . В замороженных включениях четко наблюдается образование льда, плавление которого происходит в диапазоне –21.2...–27.3°C.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на некоторые различия в морфологии руд месторождения Снежное, установлено, что продуктивная ассоциация состоит из единого набора минералов с различными соотношениями последних. Поскольку в рудах образовался парагенезис Флюорит + КПШ + Альбит + Фенакит + Берилл + Кварц ± Биотит/Мусковит, растворы, формировавшие руды, были обогащены не только Be, но и F, K, Na, Si, Al, Fe и Ca. Единый состав рудной ассоциации в разных типах оруденения свидетельствует о близком временном интервале формирования руд месторождения, что не противоречит наблюдаемым геологическим взаимоотношениям выделенных типов руд.

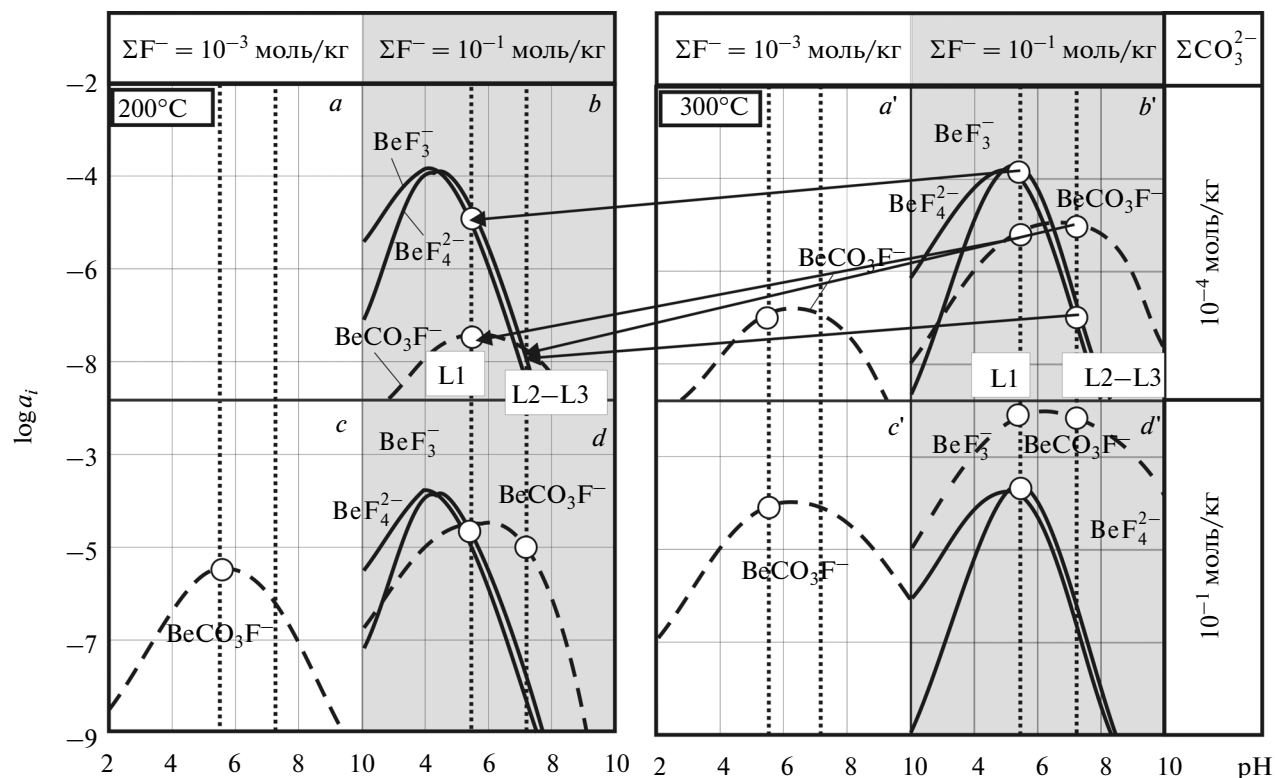
Основные типы руд (I–III) представляют собой брекчиевые и прожилковые руды, сложенные средне-, крупнозернистыми агрегатами рудообразующих минералов с кристаллами свободного роста в гидротермальном цементе минерализованной брекчии или в прожилках. Это дает основание считать, что основным механизмом образования этих руд было выполнение полостей и трещин вследствие охлаждения растворов, а не замещение боковых пород.

Высокие содержания флюорита во всех типах руд предполагают повышенную концентрацию F в рудообразующих растворах. Из-за присутствия других солевых компонентов определить количественно методом криометрии содержание F практически невозможно.

Поскольку интервалы температур гомогенизации ФВ из трех типов руд перекрываются (см. табл. 2), то можно предполагать, что их формирование происходило в близких температурных условиях от 230 до 340°C. По общему содержанию солей во включениях (см. табл. 2) без учета твердых фаз, ФВ-А и ФВ-Б близки: 3.6–7.6 мас. % (экв. NaCl), для ФВ-Б характерна более высокая соленость до 18 мас. % экв. NaCl. Интервалы  $T_{\text{эвт}}$  для ФВ-А и ФВ-В различаются незначительно и наиболее соответствуют температурам эвтектики растворов  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{CO}_3-\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{KF} \cdot \text{H}_2\text{O}$  для ФВ-А и  $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$  для ФВ-В (Борисенко, 1977, 1982). Для II типа руд (ФВ-Б)  $T_{\text{эвт}}$  несколько ниже (см. табл. 2), эти значения наиболее близки температурам эвтектики растворов  $\text{Na}_2\text{CO}_3-\text{K}_2\text{CO}_3-\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{NaCl}-\text{FeCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ , что свидетельствует о присутствии этих солей в составе рудообразующих растворов и, соответственно, в составе рудных минералов.

Выявленные особенности минерального состава руд дают возможность приблизительно оценить кислотность растворов, сформировавших их. Отсутствие в рудах I типа и во флюоритовом и флюорит-микроклиновом телах щелочных темноцветных минералов, а также микроклина с признаками мусковитизации может свидетельствовать о том, что рудообразующие растворы этих типов (L1 и L5) были скорее околонейтральными, чем щелочными или кислыми. А поскольку во включениях из руд II и III типа присутствуют такие щелочные карбонаты, как нахолит и шортит, можно предполагать, что рудообразующие растворы L2 и L3 имели повышенную щелочность.

Повышенные содержания флюорита ( $\text{CaF}_2$ ) в рудах (до 15–30% в среднем) при отсутствии высококальциевых боковых пород (например, известняков), а также присутствие во флюидных включениях карбонатов (шортита и кальцита) и Ca-содержащего яффейта предполагают, что в рудообразующих растворах происходил совместный перенос Ca и F. Известно, что растворимость флюорита резко возрастает при увеличении концентрации электролитов ( $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ ) в растворах за счет образования комплексных соединений типа  $\text{Na}_2\text{CaF}_4^0$ ,  $\text{Ca}_2\text{Cl}_3\text{F}^0$ ,  $\text{Ca}_2\text{Cl}_2\text{F}_2$ , а также при росте температуры и давления (Малинин, Куровская, 1992, 1996; Рыженко и др., 1994; Tropper *et al.*, 2007). По данным Холланда (Холланд, Малинин, 1982), повышенная растворимость  $\text{CaF}_2$  в азотной кислоте связана с образованием комплекса  $\text{HF}^0$ . Поэтому при  $T \geq 400-500^\circ\text{C}$  растворы с высокими содержаниями F могут переносить и Ca и F в растворенном виде. Приведенные в работе (Tropper *et al.*, 2007) обобщенные данные свидетельствуют о сходном поведении  $\text{CaF}_2$  в рас-



Фиг. 4. Соотношение комплексных соединений Be в растворе, равновесном с фенакитом и кварцем при 200 и 300°C в зависимости от активности  $F^-$  и  $CO_3^{2-}$  (Wood, 1992).

Пунктир — значение pH, соответствующее нейтральной точке воды при 200–300°C. Стрелками показано изменение растворимости фторидных и фтор-карбонатных комплексов Be при понижении температуры.

творях и при более низких температурах (100–400°C).

Совместный перенос Ca и F наблюдался в рудообразующих растворах, сформировавших прожилковое оруденение в сланцах из I, II и XII рудных зон Ермаковского F–Be-месторождения (Дамдинова, 2001; Дамдинова, Рейф, 2004, 2005, 2008).

Стабильность отдельных водно-растворимых соединений бериллия экспериментально изучалась многими учеными, но наиболее полное современное исследование этого вопроса выполнено С. Вудом, который на основании имеющихся экспериментальных данных и собственных термодинамических расчетов оценил растворимость комплексных соединений бериллия с большим количеством лигандов в широком диапазоне значений pH, активностей  $F^-$  и  $CO_3^{2-}$  (Wood, 1992). По его данным, растворимость хлоридных, гидроксидных, карбонатных и сульфатных комплексов Be в гидротермальных растворах не превышает одной части на миллион (0.000 п%), так что их роль в рудообразовании пренебрежимо мала. Поэтому на демонстрируемой диаграмме (фиг. 4) показана растворимость только ведущих фторидных и фторкарбонатных комплексов бериллия.

Вертикальные колонки на диаграмме (фиг. 4) соответствуют растворам с высокой (затененная) и низкой активностью  $F^-$ . Верхняя (секторы a, a' и b, b') и нижняя (секторы c, c' и d, d'') половины диаграммы характеризуют растворимость (стабильность) комплексов Be при низкой ( $10^{-4}$  м) и высокой ( $10^{-1}$  м) активности иона  $CO_3^{2-}$ , зависящей от содержания  $CO_2$  в растворах. Как видно, малофтористые растворы (светлые вертикальные колонки диаграммы) способны транспортировать бериллий только в виде фторкарбонатных комплексов, однако их растворимость крайне низка даже при высокой активности  $CO_3^{2-}$ . В высокофтористых растворах растворимость бериллия в основном обеспечивается фторокомплексами  $BeF_3^-$  и  $BeF_4^{2-}$ , а при высокой активности иона  $CO_3^{2-}$  — фторкарбонатным комплексом  $BeCO_3F^-$ .

С увеличением кислотности (pH < 4) и щелочности (pH > 8) растворимость обсуждаемых комплексов резко уменьшается (фиг. 4). Чтобы продемонстрировать влияние этого фактора, на диаграмме штриховыми линиями нанесены значения

щелочности-кислотности растворов  $pH \sim 5.3$ , соответствующие нейтральной точке воды при  $300^\circ C$ , интерпретируемые как  $pH$  околонейтральных гидротермальных растворов **L1** и значения  $pH \sim 7$ , соответствующие растворам повышенной щелочности **L2** и **L3**.

Условия, при которых рудообразующие растворы были обогащены фтором, соответствуют правым затененным колонкам диаграммы  $b$ ,  $d$  и  $b'$ ,  $d'$  (с высоким содержанием F). Определение  $CO_2$  во ФВ только методом КР-спектроскопии ( $CO_2$  не фиксировалась при криометрических исследованиях) свидетельствует об ее очень низкой концентрации, что соответствует верхней части диаграммы ( $a$ ,  $b$  и  $a'$ ,  $b'$ ). Согласно диаграмме, при фиксированных параметрах  $T = 300^\circ C$ ,  $aF^- = 10^{-1} m$ ,  $aCO_3^{2-} = 10^{-4} m$  в околонейтральных (левый пункт) растворах **L1** доминирующими являются фторидные комплексы ( $BeF_3^{2-}$ ,  $BeF_4^{3-}$ ), роль фтор-карбонатных ( $BeCO_3F^-$ ) комплексов в этих условиях второстепенна. Понижение температуры с  $300$  до  $200^\circ C$  (фиг. 4, секторы  $b' \rightarrow b$ ) приводит к падению растворимости всех комплексов Be на 1–2 порядка, что сопровождается интенсивным осаждением бериллия в виде собственных минеральных фаз в рудных телах.

Для растворов повышенной щелочности (**L2** и **L3**, правый пункт) в этих условиях доминирующими являются фтор-карбонатные комплексы, роль фторидных комплексов значительно меньше. При понижении температуры на  $100^\circ C$  растворимость фтор-карбонатных комплексов падает на 3–4 порядка, что и согласуется с высоким содержанием минералов бериллия в этих рудах. Растворимость фторидных комплексов в этих условиях очень низка и с понижением температуры до  $200^\circ C$  меняется незначительно.

Таким образом, отложение бериллиевых минералов в рудах происходило при движении щелочных и околонейтральных растворов по трещинам и пустотам в результате уменьшения растворимости фторокомплексов, обусловленного понижением температуры при попадании их в близповерхностную зону дробления.

## ВЫВОДЫ

Прожилковые и брекчиевые рудные тела месторождения Снежное сформировались преимущественно путем выполнения трещин и полосей, а не замещения малокальциевых рудовмещающих пород.

Установлено, что продуктивная ассоциация трех основных наиболее богатых типов руд состоит из единого набора минералов с различными соотношениями последних. Поскольку в рудах формировался парагенезис Флюорит  $\pm$  КПШ + Альбит +

+ Фенакит + Берилл + Кальцит + Кварц  $\pm$  Биотит/Мусковит, растворы, формировавшие руды, были обогащены не только Be, но и F, K, Na, Si, Al, Ca, Fe.

Кальций и фтор, необходимые для образования флюорита в I–III типах руд, привносились высокофтористыми околонейтральными растворами (I тип) и растворами повышенной щелочности (II, III типы) в незначительных количествах содержащими  $CO_2$ , в виде комплексных соединений типа  $Na_2CaF_4^0$ ,  $Ca_2Cl_3F^0$ ,  $Ca_2Cl_2F_2$  и др.

Отложение бериллиевых минералов происходило в интервале от  $\geq +340$  до  $+230^\circ C$  в результате охлаждения растворов, которое приводило к распаду фторокомплексов Be и интенсивному отложению минералов бериллия, что обусловило формирование богатых бериллиевых руд на месторождении.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.В. Канакину и Е.В. Ходыревой за проведение анализов на электронном сканирующем микроскопе, Т.И. Казанцевой за проведение атомно-эмиссионного спектрального анализа, Г.П. Ключеревой за изготовление шлифов и полированных пластин.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты: № 12-05-31132 мол-а, № 14-05-00339-а).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беус А.А. Геохимия бериллия и генетические типы бериллиевых месторождений. М. Изд-во АН СССР, 1960. 329 с.
- Борисенко А.С. Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Борисенко А.С. Анализ солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М.: Недра, 1982. С. 37–47.
- Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия // Москва: Недра, 1975. 247 с.
- Гинзбург А.И., Заболотная Н.П., Куприянова И.И. и др. Берtrandит-фенакитовые месторождения — новый тип бериллиевого сырья // Геология месторождений редких элементов. М.: Недра, 1965. Вып. 27.
- Гинзбург А.И., Заболотная Н.П., Новикова М.И., Гальченко В.И. Генетические особенности флюорит-фенакит-берtrandитового оруденения // Разведка и охрана недр. 1969. № 1. С. 3–10.
- Гинзбург А.И., Новикова М.И., Гальченко В.И. Эвиденция в месторождениях флюорит-берtrandит-фенакитовой формации // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 6. С. 1453–1457.

- Дамдинова Л.Б.* Условия совместного переноса Са и F при формировании фенакит-флюоритовой минерализации в алюмосиликатных породах Ермаковского F–Ве месторождения. Труды X Междунар. конф. по термобарогеохимии. Александров, ВНИИСИМС, 2001. С. 262–272.
- Дамдинова Л.Б.* Условия и факторы, влиявшие на эффективность переноса и отложения Ве из рудоносных растворов Ермаковского F–Ве месторождения (по результатам изучения флюидных включений). Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. 2005. 29 с.
- Дамдинова Л.Б., Рейф Ф.Г.* Особенности формирования разнотипной прожилковой бериллиевой минерализации на Ермаковском F–Ве месторождении (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2004. Т. 5. № 8. С. 979–991.
- Дамдинова Л.Б., Рейф Ф.Г.* Тайниолит в рудах Ермаковского F–Ве месторождения: закономерности распространения, условия формирования // Геология руд. 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–Ве руд // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 11. С. 1084–1097.
- Куприянова И.И., Шпанов Е.П.* // Бериллиевые месторождения России М.: ГЕОС. 2011. 353 с.
- Лыхин Д.А., Костицин Ю.А., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Рипп Г.С.* Рудоносный магматизм Ермаковского бериллиевого месторождения в Западном Забайкалье: возраст, источники магм и соотношение с оруденением // Геология руд. месторождений. 2001. Т. 43. № 1. С. 52–70.
- Малинин С.Д., Куровская Н.А.* Экспериментальное изучение растворимости шеелита в водных растворах хлоридов натрия, кальция и калия при температурах 600–800°C и давлении 2 кбар // Геохимия. 1992. № 7. С. 993–1006.
- Малинин С.Д., Куровская Н.А.* Растворимость флюорита в водных растворах NaCl, CaCl<sub>2</sub> и их смесей при температурах 400–600°C и давлении 2 кбар // Геохимия. 1996. Т. 96. № 12. С. 1065–1069.
- Новикова М.И., Шпанов Е.П., Куприянова И.И.* Петрография Ермаковского бериллиевого месторождения, Западное Забайкалье // Петрология. 1994. Т. 2. № 1. С. 114–127.
- Новикова М.И., Куприянова И.И., Кукушкина О.А., Шпанов Е.П., Кувшинова К.А.* Индикаторные свойства флюорита Ермаковского флюорит-бериллиевого месторождения (Бурятия, Россия) // Геология руд. месторождений. 1998. Т. 40. № 5. С. 459–476.
- Рейф Ф.Г.* Щелочные граниты и бериллиевое (фенакит-бертрандитовое) оруденение на примере Оротского и Ермаковского месторождений // Геохимия. 2008. № 3. С. 243–263.
- Рейф Ф.Г., Ишков Ю.М.* Ве-носные сульфатно-фторидные рассолы — продукт дистилляции остаточных пегматитов щелочно-гранитной интрузии (Ермаковское F–Ве месторождение, Забайкалье) // Геохимия. 1999. № 10. С. 1096–1111.
- Рейф Ф.Г., Ишков Ю.М.* Несмесимые фазы гетерогенного магматического флюида, их рудная специализация и раздельная миграция при формировании Ермаковского F–Ве месторождения // ДАН. 2003. Т. 390. № 3. С. 1–3.
- Рейф Ф.Г., Дамдинова Л.Б., Ишков Ю.М., Карманов Н.С.* Разная рудная специализация флюидных потоков, одновременно выделяемых единой гранитной интрузией // ИМГРЭ, 2005.
- Рыженко Б.Н., Князева С.Н., Малинин С.Д., Куровская Н.А.* Оценка формы растворенных частиц в системе CaF<sub>2(k)</sub>–NaCl–CaCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O при 800°C и 2 кбар методом термодинамического моделирования // Геохимия. 1994. № 4. С. 467–475.
- Стельмачонок К.З., Ишков Ю.М.* Металлоносность рудообразующих растворов Ермаковского бериллиевого месторождения // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 5. С. 802–814.
- Холланд Г.Д., Малинин С.Д.* Растворимость и распространение нерудных минералов // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М: Мир, 1982. С. 370–405.
- Ярмолюк В.В., Лыхин Д.А., Шурига Т.Н., Воронцов А.А., Сугоракова А.М.* // Возраст, состав пород, руд и геологическое положение бериллиевого месторождения Снежное: к обоснованию позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометальной зоны (Россия) // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53. № 5. С. 438–449.
- 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.
- Brown P.E.* FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // Amer. Miner. 1989. V. 74. P. 1390–1393.
- Kremenetsky A.A., Beskin S.M., Lehmann B., Seltman R.* Economic geology of granite-related ore deposits of Russia and other FSU countries: an overview // Ore-bearing granites of Russia and adjacent countries. Moscow: IMGRE, 2000. P. 3–56.
- Reyf F.G.* Immiscible phases of magmatic fluid and their relation to Be and Mo mineralization at the Yermakovka F–Be-deposit, Transbaikalia, Russia // Chem. Geol. 2004. V. 210. P. 49–71.
- Tropper P., Manning C.E.* The solubility of fluorite in H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O–NaCl at high pressure and temperature // Chem. Geol. 2007. V. 242. Iss. 3–4. P. 299–306.
- 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 Geol. Rev. 1992. V. 7. P. 249–278.