

Рис.2. Перовскит

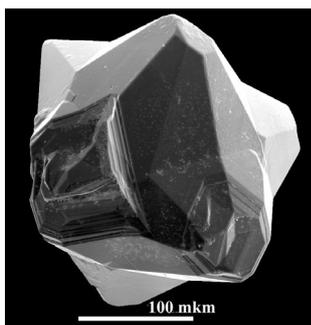


Рис.3. Кальцитит

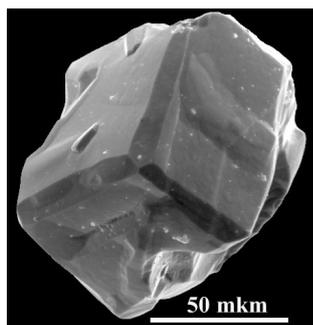


Рис.4. Бастнезит



Рис.5. Бадделлит

Таблица 4. Формульные коэффициенты кальцититов

Анализы	1	2
Структурная формула рассчитана на 16 атомов кислорода		
Ca	1,96	1,95
Al	0,19	-
Fe	0,15	0,09
Ti	1,77	2,03
Zr	5,00	4,93

Примечания: кратеры: 1- Кизета, 2- Лалуни. Аналитик: Антонов А.В. (ВСЕГЕИ)

Бастнезит представлен мелкими темно-красными ромбоэдрическими кристаллами, двойниками и сростками, зернами с индукционными гранями (рис. 4). В составе минерала резко преобладает церий.

Бадделлит обнаружен в виде достаточно крупных (до 0,5 мм) бесцветных вытянутых кристаллов (рис. 5). В химическом составе минерала не обнаружено примесей, за исключением гафния.

ЛИТЕРАТУРА

- Hogarth D.D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, Volume 62, 1977
 Чернышева Е.А., Нечелюстов Г.Н., Квитко Т.Д., Вейс Б.Т. Эволюция состава перовскита в щелочных породах нижне-сянского карбонатитового комплекса. *Геохимия*, №9, 1990
 Linda S. Campbell, P. Henderson, F. Wall. Rare earth chemistry of perovskite group minerals from the Gardiner Complex, East Greenland. *Mineralogical Magazine*, vol. 61, 1997

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦЕ ЩЕЛОЧНЫХ ГРАНИТОВ ЕРМАКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ

Лыхин Д. А., Козловский А.М.
 ИГЕМ РАН, Москва, liha@igem.ru

В составе комплексных исследований магматизма и рудообразования на Ермаковском флюорит-фенакит-бертрандитовом месторождении нами были выполнены работы по изучению расплавных включений во вкрапленниках кварца рудоносного Штока щелочных гранитов. Ермаковское месторождение является одним из самых крупных месторождений бериллия на территории России. Оно расположено в Западном Забайкалье и пространственно и во времени связано с щелочными гранитами (Лыхин и др., 2001). Ермаковское месторождение относится к бертрандит-фенакитовой формации (Гинзбург и др., 1965) а так же является уникальным по запасам, минералогии и содержанию бериллия до 1,3 % BeO (Куприянова и др., 1994). Наиболее полные сведения о геологическом строении месторождения, главных минеральных типах руд и их генезисе представлены в работах (Гинзбурга и др., 1969, 1977; Новиковой и др., 1994, 1998).

Петрографически рудоносный Шток щелочных гранитов представлен порфировидными породами с вкрапленниками кварца и щелочного пертитового полевого шпата в количестве до 20 %. Основная масса пород мелкозернистая и состоит из тех же минералов, тонкорассеянного рудного минерала, а также акцессорного циркона.

Таблица 1. Составы гомогенизированных стекол расплавных включений из щелочных гранитов

№ пробы	E-300-3	E-300-8	E-300-13	E-300-14	E-300-15	E-300-18	E-300-21	E-300-23	E-400-1	E-400-4	E-400-5
Размер (мкм)	33	37	30	44	59	30	30	74	30	30	30
SiO ₂	73,78	66,66	72,89	70,25	71,04	73,37	71,55	72,22	68,97	70,82	70,77
TiO ₂	0,23	0,28	0,31	0,51	0,2	0,14	0,15	0,21	0,17	0,04	0,15
Al ₂ O ₃	10,55	13,7	10,59	8,55	10,45	10,11	9,8	8,01	8,85	12,44	10,29
FeO	2,74	4,27	3,73	6,48	2,75	3,56	3,64	2,73	2,45	0,85	1,93
MnO	0,31	0,32	0,27	0,62	0,36	0,16	0,17	0,21	0,23	0,19	0,28
MgO	0,01	0,01	0	0,07	0,03	0,02	0,05	0,05	0,04	0,02	0,04
CaO	0,01	0,02	0,05	0,04	0	0	0	0	0,1	0	0,15
Na ₂ O	4,65	5,47	5,25	3,43	4,75	3,53	3,74	4,93	4,09	3,52	2,28
K ₂ O	4,58	6,67	5,24	5,43	4,53	4,91	5,87	4,38	5,83	6,42	6,23
P ₂ O ₅	0	0	0	0,04	0,02	0	0,01	0,04	0	0	0
Rb	0	1660	3510	0	0	1810	1910	1390	-	-	-
Zr	2900	2000	4700	1900	1300	2400	3400	1300	-	-	-
F	1,1	0,99	2,27	2,1	1,12	0,79	1,76	1,27	1,73	1,11	1,62
Cl	0,09	0,02	0,06	0,02	0,22	0,02	0,06	0,04	0,4	0,11	0,29
к.а.	1,19	1,18	1,35	1,35	1,22	1,10	1,28	1,60	1,47	1,02	1,02
Сумма	96,86	97,4	98,33	95,42	94,1	95,8	94,98	92,78	90,73	94,3	92,12
Cr	0,39	0,4	1,5	0,41	0,58	0,41	0,37	0,44	0,43	0,54	0,4
Sr	0,39	40	62	5,8	0,91	71	16	1,64	0,79	2,6	5,4
Zr	1227	807	3420	1793	1238	1704	2156	618	249	267	211
Ba	1,6	6,1	22	11	5,8	11	8,8	7	2	5,8	16
Ce	89	171	233	190	106	137	159	66	94	101	93
Sm	1,8	3,68	9,7	7	2,14	4,9	5,1	1,93	1,8	2,1	1,8
Er	4,6	4,19	15	11	4,41	9	10	4,19	2,1	1,6	2,9
Th	40	132	117	97	40	201	85	36	33	26	29
Yb	6	5,23	19,5	15	5,6	12	13,7	5,66	2,4	2,7	3,9
Dy	3,9	4,41	16	11	4,2	8,6	9,3	3,89	2,48	1,4	2,82
Eu	0,33	0,67	1,78	1,52	0,53	1,02	1,28	0,42	0,09	0,16	0,18
Nd	13	28	50	39	16	24	32	11	13	15	13
La	58	118	128	108	68	81	89	43	76	66	71
Nb	98	66	257	222	104	75	68	95	77	14	80
Y	43	36	154	109	46	88	72	39	30	9,2	30
Ti	1244	835	1975	1803	1206	651	828	1155	680	168	759
B	40	7,6	28	26	50	21	18	14	67	23	81
Li	1511	873	1780	1323	1591	935	420	1548	1844	1162	201
Be	22	12	21	18	22	18	11	16	25	17	25
H ₂ O	4,6	5,4	3,6	4,62	5	6,7	3,5	4,45	4,7	5,8	6

Во вкрапленниках кварца трех образцов щелочных гранитов отобранных из различных зон Штока нами обнаружены первичные расплавные включения. Синегенетичных флюидных включений обнаружено не было. Также отмечались кристаллические включения представленные щелочным амфиболом и щелочным полевым шпатом. Все расплавные включения раскристаллизованы и имеют форму отрицательных кристаллов сильно искаженных за счет осажденного на стенки вакуолей кварца. В раскристаллизованном теле включений отмечаются кристаллы щелочного амфибола, радиально-лучистые агрегаты чешуек слюды и удлиненные кристаллы щелочного полевого шпата. Во многих включениях отмечается едва различимый маленький газовый пузырь. Размеры расплавных включений преимущественно 10-20 мкм, редко встречаются включения до 30 мкм, но они, как правило, «взорваны» и окружены ореолом мелких включений.

Опыты по гомогенизации расплавных включений проводились в аппарате высокого давления в ИЭМ РАН. Выдержка при постоянных температуре и давлении составляла 24 ч. Давление в опыте – 3 кбар, температура – 750° С. После опыта с заданными параметрами в двух образцах расплавные включения были полностью гомогенными и состояли из прозрачного стекла. Расплавные включения третьего образца были частично сгомогенизированы. В них оставались реликты темноцветным минералов и небольшой газовый пузырь заключенные в прозрачное стекло. Тот факт, что не все расплавные включения были сгомогенизированы свидетельствует о температуре в опыте близкой к истинной температуре расплава.

Составы гомогенизированных стекол расплавных включений двух образцов по содержанию SiO₂ варьируют от 73,6 до 78,1 мас. % (табл №1.). Исключение составляет один состав с SiO₂ 68,4 мас. %. Для всех стекол характерны высокие содержания щелочей достигающие в сумме 11 мас. % и коэффициент апгаитности

преимущественно выше 1 (от 0,9 до 1,6). Петрогенные элементы в гомогенных стеклах образуют отчетливые корреляционные зависимости с SiO_2 . Отрицательные тренды отмечаются для TiO_2 , FeO , Na_2O , K_2O и Ca . Глинозем не образует отчетливых корреляций с кремнекислотностью и варьирует от 8,6 до 14 мас. %, причем большинство составов образца Е-300 с концентрациями Al_2O_3 менее 12 мас. %

формируют слабый положительный тренд. MgO , CaO и P_2O_5 , в целом не характерные для щелочных гранитов элементы, в стеклах расплавных включений составляют менее 0,15 мас. %; отчетливых тенденций для этих элементов не наблюдается. Среди отличий составов включений двух образцов можно отметить более высокие в стеклах образца Е-400 концентрации K_2O , Al_2O_3 и более низкие - TiO_2 и FeO . Составы пород, во вкрапленниках которых изучались расплавные включения, в целом идентичны составам включений.

В нормативном составе стекол расплавных включений и щелочных гранитов Штока преобладающими компонентами, составляющими в сумме более 85 %, являются кварц, альбит и ортоклаз. Также все стекла и породы содержат нормативный акмит в количестве от 0,4 до 3,7 %, а некоторые из них метасиликат натрия от 1,8 до 5,5 %.

Крупные гомогенные стекла размером более 30 мкм были проанализированы на содержания элементов примесей и воды на ионном микрозонде. Все гомогенные стекла двух образцов и щелочные граниты имеют идентичные спектры распределения микроэлементов. Для них типичны глубокие минимумы относительно среднего состава континентальной коры для Ba , Sr , Ti и максимум для Zr . Также у стекол расплавных включений наблюдается неярко выраженный европиевый минимум, хотя щелочные граниты обладают глубоким минимумом этого элемента. Все породы и стекла обладают высокими содержаниями большинства высокозарядных и крупноионных редких элементов в несколько раз превышающими средние их концентрации в континентальной коре. Вариации содержаний этих элементов в стеклах составляют более одного порядка. Спектр редкоземельных элементов показывает преимущественно слабое обогащение легкими редкоземельными элементами относительно тяжелых. Нормированные отношения $(\text{La}/\text{Yb})_N$ варьируют от 0,9 до 4,4, и в среднем составляют 1,9. Особый интерес представляют содержания Be в расплавах щелочных гранитов, с которыми, связано пространственно и во времени, Ермаковское месторождение – одно из крупнейших бериллиевых месторождений мира. Так гомогенные стекла расплавных включений содержат от 11 до 25 г/т Be . Такие концентрации являются высокими как по сравнению со средним составом континентальной коры, где содержание Be составляет 1,5 г/т, так и с некоторыми редкометальными щелочными гранитами. Тем не менее, такие концентрации в щелочногранитных расплавах не являются чрезвычайно высокими, например расплавные включения в кварце редкометальных (Zr , Nb , REE) щелочных гранитов массива Халдзан-Бурегтей содержат до 340 г/т Be .

В гомогенизированных стеклах расплавных включений в кварце щелочных гранитов содержания почти всех высокозарядных микроэлементов находятся в прямой корреляционной зависимости, показывая, что во время захвата включений они являлись несовместимыми и накапливались в остаточном расплаве. Эти элементы могут быть использованы как показатели процесса кристаллизационной дифференциации и его направленности. Другим показателем кристаллизационной дифференциации является коэффициент агпаитности, значения которого увеличиваются от ранних менее дифференцированных порций расплава к более поздним, хотя его использование может быть ограничено, если среди кристаллизующихся фаз значительная доля принадлежит щелочным темноцветным минералам. Прямая корреляционная зависимость между Ca и несовместимыми редкими элементами (Zr , Nb , Y , U , Th , REE и др.) в стеклах расплавных включений щелочных гранитов Ермаковского месторождения подтверждает возможность использования и Ca и содержаний микроэлементов в качестве индекса дифференциации магматического расплава.

Микроэлементы-индексы дифференциации и Ca с содержанием кремнезема находятся в обратной корреляционной зависимости. Это свидетельствует о том, что на этапе захвата растущими кристаллами кварца капель расплава, последний обеднялся кремнеземом и обогащался Na_2O , K_2O , FeO и несовместимыми элементами. Такая направленность кристаллизационной дифференциации не является обычной для пород кислого состава. Тем не менее, нами по расплавным включениям в кварце пантеллеритов бимодальной вулканоплутонической ассоциации хр. Тост в Южной Монголии была установлена подобная тенденция, которая также фиксировалась и по составам вулканических пород (из устного сообщения А.М. Козловского).

Магмы щелочных гранатов Ермаковского месторождения богаты летучими компонентами, однако не являются насыщенными ими. Содержание воды в них варьирует от 3,5 до 6,7 мас. %. Говорить о каких-либо закономерностях ее поведения пока не приходится, поскольку для нее наблюдается лишь обратная корреляция с Ca и содержанием фтора. Концентрация F в расплаве находится в диапазоне от 0,76 до 2,27 мас. %. Самыми богатыми фтором являются наиболее дифференцированные магмы с наибольшими концентрациями несовместимых элементов и значением Ca . Также отмечается отчетливый отрицательный тренд SiO_2 с фтором, подтверждающий накопление последнего в остаточном расплаве. Содержание B в расплавах высокое и изменяется от 7 до 80 г/т. С несовместимыми элементами для него фиксируется положительная корреляция в диапазоне содержаний менее 30 г/т. Высокобористые расплавы на вариационных диаграммах располагаются обособленно.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 06-05-64217.

ЛИТЕРАТУРА

- Гинзбург А.И., Заболотная Н.П., Куприянова И.И. Берtrandит-фенакитовые месторождения - новый тип бериллиевого сырья // Геология месторождений редких элементов. Вып. 27. 1965.
- 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., Заболотная Н.П., Куприянова И.И. Закономерности формирования гидротермальных месторождений бериллия. М.: Недра, 1977.
- Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Журкова З.А. Состояние и перспективы минерально-сырьевой базы бериллия // Минеральные ресурсы России. 1996. № 3. С. 3-7.
- Лыхин Д.А., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Костицын Ю.А., Рипп Г.С., Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б. Рудоносный магматизм Ермаковского бериллиевого месторождения в Западном Забайкалье: возраст, источники магм и соотношение с оруденением // Геология рудных месторождений, 2001, Т. 44, № 1, С. 52-70.
- 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. и др. Индикаторные свойства флюорита Ермаковского флюорит-бериллиевого месторождения (Бурятия, Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 5. С. 459-476.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРЕМЫ МИНКОВСКОГО В МОРФОМЕТРИИ КРИСТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ ГРАНАТОВ г. МАКЗАПАХ

Макаров М.С., Степенщиков Д.Г., Войтеховский Ю.Л.
Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, makarov@geoksc.apatity.ru

Под морфометрией кристаллов понимается комплекс методов для полного метрического представления формы кристаллов. Исторически сложилось так, что со времени открытия закона Стено, основной характеристикой формы кристалла стали значения двугранных углов между гранями. В рамках такого

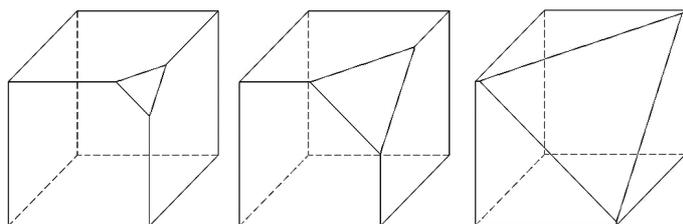


Рис. 1. Комбинаторно эквивалентные, но геометрически различные многогранники.

описания пропадает уникальность кристалла как индивида. На рис. 1 показаны три кристалла, полученные отсечением вершины куба плоскостью октаэдра, порождающей треугольную грань. Как видно, все три фигуры имеют один и тот же комбинаторный тип и значения плоских углов, но различаются площадями граней. Последняя характеристика очень важна, так как указывает на условия образования кристалла и распределение питающих его концентрационных потоков.

Задание формы кристалла с точностью до метрических характеристик позволяет однозначно указать в выбранной системе координат, какие точки пространства находятся внутри кристалла, на его поверхности или вне его. Проблемой такого описания является сложность формы кристалла. Очевидный подход – указание всех вершин полиэдра кристалла и их смежности по ребрам, не является эффективным, во-первых, из-за большого числа вершин (в общем случае, вдвое превышающего число граней), а во-вторых, из-за их слабой выраженности на плохо ограненных кристаллах. Рассматривая кристалл как тело, высекаемое в пространстве набором ориентированных плоскостей, удаленных от некоторой точки на определенные расстояния, можно прийти к описанию кристалла через вектора-нормали к его граням, длины которых равны расстоянию между гранями и выбранной точкой. Проблематичным здесь является измерение такого расстояния, и не прямое указание самих площадей граней. Самым прогрессивным способом представления кристалла является 3D лазерное сканирование, позволяющее фиксировать все точки поверхности кристалла с точностью до скульптуры граней. Недостатками такого метода являются большой объем получаемых данных, сложность их обработки (требуются специальные программы для работы с 3D объектами) и дорогое оборудование для самого сканирования.

Более перспективным представляется описание полиэдрической формы кристалла через площади граней и векторы нормалей к ним, или их индексы. Согласно теореме Минковского, существует единственный многогранник, заданный ориентировкой граней и их площадями, на которые накладывается условие:

$$\sum_{i=1}^F (S_i \cdot \vec{n}_i) = 0, \quad (1)$$