рин обогащен этим компонентом, тогда как при удалении от контакта со шпинелью содержание хрома в сапфирине уменьшается (см. таблицу).

При образовании же крупных, гомогенных по составу, зерен сапфирина основную роль играет уже не диффузия компонентов, а их инфильтрация, и поэтому состав сапфирина и парагенного с ним жедрита определяется активностью этих компонентов в растворе при данных РТ-параметрах.

Интересно, что большинство высокоглиноземистых сапфиринов, найденных в разных регионах мира и образованных при различных РТ-параметрах, встречены именно в реакционных каймах при замещении высокоглиноземистых минералов (кианита, силлиманита и др.; Schreyer, Abraham, 1975; Warren, Hensen, 1987; Liati, Seidel, 1996; Godard, Mabit, 1998), что также указывает на диффузионный контроль при формировании данного минерала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 04-05-65131), Гранта Президента Российской Федерации (проект МК-9836.2006.5) и Фонда содействия отечественной науке.

ЛИТЕРАТУРА

Серебряков Н.С., Аристов Вс.В., Гладышева А.П., Волкова Е.В. Типы корундовой минерализации в породах чупинской толщи беломорского комплекса (Северная Карелия) // Геология и геоэкология: исследования молодых. Матер. XIII молод. конфер., посвященной памяти К.О. Кратца: в 2 т. – Апатиты, 2002. – Т. 1. – С. 118-121.

Серебряков Н.С., Аристов Вс.В. Условия локализации проявлений коллекционного корунда в породах чупинской толщи беломорского комплекса в Северной Карелии // Изв. Вузов: Геология и разведка. – М.: 2004. – № 4. – С. 36-42.

Серебряков Н.С. Петрология корундсодержащих пород чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (на примере Чупинского сегмента). Автореф. канд. дисс. М., 2004. – 30 с.

Серебряков Н.С., Аристов Вс.В. Корундсодержащие породы чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (Сев. Карелия) // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения: Матер. науч. конференции и путеводитель экскурсий. – Петрозаводск, 2005. – С. 270-272.

Терехов Е.Н., Левицкий В.И. Геолого-структурные закономерности размещения корундовой минерализации в северно-западном Беломорье. // Изв. вузов. Геол. и разв., 1991, № 6, с. 3-13.

Godard G., Mabit J.-L. Peraluminous sapphirine formed during retrogression of a kyanite-bearing eclogite from Pays de Leon, Armorican Massif, France // Lithos, 1998. V. 43. P. 15-29.

Liati A., Seidel E. Metamorphic evolution and geochemistry of kyanite eclogites in central Rhodope, northern Greece // Contrib. Mineral. Petrol., 1996. V. 123. P. 293-307.

Schreyer W., Abraham K. Peraluminous sapphirine as a metastable reaction product in kyanite-gedrite-talc schist from Sar e Sang, Afghanistan // Miner. Mag., 1975. V. 40. № 310. P. 171-180.

Sengupta P., Raith M.M., Levitsky V.I. Compositional characteristics and paragenetic relations of magnesiohögbomite inaluminous amphibolites from the Belomorian complex, Baltic Shield, Russia // Amer. Miner., 2004. V. 89. P. 819–831.

Warren R. G., Hensen B. J. Peraluminous sapphirine from the Aileron district, Arunta Block, central Australia // Min. Mag. 1987. V. 51. № 361-362. Pt. 3-4. P. 409-415.

УСТОЙЧИВОСТЬ И СИНТЕЗ ТУРМАЛИНА В СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ ФЛЮИДАХ

Сеткова Т.В., Шаповалов Ю.Б., Балицкий В.С.

ИЭМ РАН, г. Черноголовка, setkova@iem.ac.ru

Турмалин – один из распространенных минералов гранитных пегматитов, а также пневматолито-гидротермальных и гидротермальных образований, хотя нередко встречается в качестве породообразующего минерала, как в самих гранитах, так и метасоматитах и метаморфических породах. Благодаря яркой и разнообразной окраске, высокой твердости и отсутствию спайности монокристаллы турмалина издавна находят применение в качестве популярного ограночного материала. Вместе с тем, турмалин обладает ценными пъезо- и пироэлектрическими свойствами, а использование его в пъезотехнике, позволит существенно повысить чувствительность подобного рода аппаратуры. Между тем, многие вопросы образования турмалина до сих пор остаются не выясненными, несмотря на многочисленные геолого-минералогические, геохимические и кристаллохимические исследования. В частности, не установлены такие важные характеристики турмалина как его устойчивость и растворимость в сверхкритических водных флюидах различного состава в широком интервале температур и давлений и не разработаны надежные и воспроизводимые методы выращивания его монокристаллов.

С целью выяснения устойчивости и возможности выращивания турмалина, были осуществлены эксперименты в водных растворах борной кислоты, ее смеси с фтористо-водородной и соляной кислотами, а также фторидами и хлоридами щелочных и тяжелых металлов при температурах 450 - 750°С и давлениях до 1,5 кб. Опыты проводились в автоклавах объемом 20, 30 и 50 см³, изготовленных из титанового и хромоникелевого сплавов. В качестве образцов для изучения устойчивости турмалина и затравок использовались призматические монокристаллы эльбаита из Малханского месторождения (Забайкалье) размером от 3x3x10 до 5x5x10 мм. Питательной шихтой служили либо монокристаллы эльбаита иногда с добавлением кварца, либо смесь из монокристаллов кварца и корунда, взятых в соотношениях, близких по стехиометрии к турмалину. Опыты проводились в термоградиентных условиях при отсутствии в автоклаве разделительной диафрагмы. Температура измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары с точностью $\pm 5^{\circ}$ С, давление задавалось коэффициентом заполнения автоклава. Характер растворения турмалина и новообразованные фазы изучались под бинокулярной лупой и поляризационным микроскопом, а также с помощью рентгенофазового и электронно-зондового микроанализа на цифровом электронном сканирующем микроскопе CamScan MV2300 (VEGA TS 5130MM)ТРРТ, оснащенным YAG детекторами вторичных и отраженных электронов и энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA Energy.

В результате было выяснено, что эльбаит в слабо кислых водно-боратных флюидах (концентрация H_3BO_3 менее 6 масс. %) при указанных выше T-P параметрах ведет себя крайне инертно. Однако при повышении концентрации H_3BO_3 до 12 масс. % как затравочный, так и шихтовой эльбаит замещаются тонкой пленкой шерла (вероятно, диффузионно, за счет железа, поступающего в раствор при коррозии стенок автоклавов). При этом на поверхности затравочного кристалла образуются правильно ограненные мелкие призматические кристаллики шерла размером до 1 мм, а обломки эльбаита в шихте несут следы растворения. Добавление в шихту кварца не вносит изменения в характер растворения и переноса эльбаита, так же как присутствие эльбаита не влияет на интенсивность растворения и переотложения кварца.

В кислых алюмо-фторидных флюидах при температуре 700 °C эльбаит неустойчив и интенсивно растворяется с образованием, по крайней мере, двух тонкокристаллических фаз - кварца и топаза, покрывающих поверхность обломков шихты и затравочных кристаллов.

В растворах 5 масс. % NH₄F и 5 масс. % NH₄F+10 масс. % H₃BO₃ при температурах 600 и 750°C и давлениях порядка 1кб поверхность затравок и шихты покрывается тонкокристаллической фазой с правильно сформированными кристаллами AlF₃, блокирующими как растворение, так и рост эльбаита. Наиболее заметное растворение эльбаитовой затравки и шихты наблюдается в опытах с раствором 10масс. % LiF. Растворение сопровождается образованием сростков мелких (десятые и сотые доли мм) хорошо сформированных кристалликов кианита и кристобалита.



Наросций слой Ватравка 2 мм

Рис. 1. Затравочный кристалл эльбаита и наросший на него слой Со-турмалина.



Рост турмалина на затравку наблюдался только в опытах с использованием растворов 10 масс. % NaCl + 15 масс. % $H_3BO_3 + 20$ масс. % NiCl₂·6H₂O, 10 масс. % NaCl + 15 масс. % $H_3BO_3 + 20$ масс. % CoCl₂·6H₂O и 10 масс. % NaCl + 15 масс. % H₃BO₃ + 20 масс. % H₃BO₃ + 20 масс. % CoCl₂·6H₂O и 10 масс. % NaCl + 15 масс. % H₃BO₃ + 20 масс. % FeCl₂·6H₂O при температуре 500°C и давлении порядка 1 кб. В качестве шихты в этих опытах использовались монокристальные корундовые и кварцевые стержни, которые помещались на дно автоклава. Эльбаитовые затравки размещались в верхней и нижней зонах автоклава. Продолжительность опытов составляла 20 суток. Нарастание турмалина на затравках происходило как в нижней, так и верхней зонах автоклава на грани {+001}. При использовании в опытах сoCl₂·6H₂O новообразованный слой характеризуется интенсивной розовой окраской (рис. 1.), в опытах с NiCl₂·6H₂O – бледно-зеленой а в случае с FeCl₂·6H₂O – черной (рис. 2.). Толщина нароста не превышает 0,5, 0,06 и 0,3 мм, соответственно. Помимо этого на затравках и на шихте наблюдается большое количество спонтанных кристаллов тур-

малина размером до 50 мкм того же состава, что и наросший слой. Микрозондовое и рентгеновское изучение новообразованных слоев указывает на принадлежность их, соответственно, к синтетическим аналогам кобальтового и никелевого турмалина (см. таблицу).

Компонент	Со-турмалин		Ni- турмалин		Fe-турмалин (шерл)	
	Затравка	Наросший слой	Затравка	Наросший слой	Затравка	Наросший слой
SiO ₂	40.70	32.98	42.14	32.76	38.42	33.82
TiO ₂	0.06	0.46	0.00	0.56	0.11	0.00
Al ₂ O ₃	40.88	37.87	35.96	37.50	42.30	38.52
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	11.60
MnO	0.24	0.05	0.13	0.28	0.41	0.06
MgO	0.02	0.15	0.08	0.00	0.00	0.38
Cr ₂ O ₃	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	1.32	0.03	1.66	0.23	1.61	0.06
Na ₂ O	1.53	1.93	1.99	1.29	1.64	1.90
K ₂ O	0.03	0.01	0.15	0.05	0.03	0.03
CoO	0.10	15.14	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00	0.26	11.96	0.02	1.29
F -	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.05
Total	84.91	88.69	82.37	84.61	85.46	87.69

Химические составы затравочных кристаллов и наросших слоев Co-, Ni- и Fe-турмалинов

Таким образом, осуществлен комплекс экспериментальных исследований, позволивших определить широкую область Т-Р параметров (до 700°С) и составов растворов (pH до 1), в которых турмалин имеет высокую устойчивость и очень низкую растворимость. Это объясняет сложность его перекристаллизации в сверхкритических водных флюидах, хотя в тех же условиях легко осуществим его синтез из исходных компонентов.

Авторы выражают благодарность В.Е. Загорскому за предоставленные для опытов образцы эльбаита из Малханского месторождения (Забайкалье).

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 06-05-64900а).

ПЕРЕЧИСЛЕНИЕ ВЫПУКЛЫХ ПОЛИЭДРОВ БЕЗ 3- И 4-УГОЛЬНЫХ ГРАНЕЙ

Сотникова Т.Д., Степенщиков Д.Г., Войтеховский Ю.Л. КФ ПетрГУ, Апатиты, <u>dm706390@mail.ru</u>

Для целей кристаллографии важно знать все выпуклые полиэдры с заданным числом вершин, рёбер и граней. Систематическое перечисление их комбинаторных типов было начато Т.П. Киркманом (1862/63), описавшим все 4- ... 8-эдры и дуальные к ним 4- ... 8-вершинники. Е.С.Фёдоров (1893) изобразил все 4- ... 7-, а также простые (в каждой вершине сходятся ровно три грани) 8- и 9-эдры. О. Гермес (1899) нарисовал все 4- ... 8-, М. Брюкнер (1900) – простые 4- ... 10-эдры, К.Дж. Бувкэмп (1946) – полиэдры с числом рёбер до 14. Д.У. Грейс (1965, неопубл.) нашёл число простых 4- ... 11-эдров, Р. Боуэн и С. Фиск (1969) – числа 4- ... 12-вершинных триангуляций на сфере. Они совпадают с числами дуальных к ним простых 4- ... 12-эдров. П.Дж. Федерико (1969) установил полное число 9-эдров. Д. Бриттон и Дж. Дюнитц (1973) изобразили все 4- ... 8-вершинники, П.Дж. Федерико (1975) – 4- ... 8-эдры. Число 10-эдров установлено в (Дуйджвестийн, Федерико, 1981), 11-, 12и простых 13-эдров – в (Энгель, 1982, 1994). В работах (Войтеховский, 1998 а, 6; Voytekhovsky, Stepenshchikov, 1995, 1996) повторены результаты указанных авторов, исправлены ошибки и перечислены все 4- ... 12- и простые 13- ... 16-эдры. Все они охарактеризованы точечными группами симметрии.

Алгоритмы получения выпуклых полиэдров. Для генерирования полного комбинаторного многообразия выпуклых полиэдров известен федоровский алгоритм. Из уравнения Эбергардта (см. далее) следует, что невозможен выпуклый полиэдр без 3-, 4- и 5-угольных граней одновременно. Для получения таких граней сечениями исходного тетраэдра Е.С. Федоров предложил три процедуры: α) отсечение вершины 3-угольной гранью; β) отсечение ребра 4-угольной гранью; γ) отсечение двух смежных ребер 5-угольной гранью. Их рациональное применение состоит в следующем. Операция α применяется для получения полиэдров, в которых есть хотя бы одна 3-угольная грань; β – для получения полиэдров, на которых нет 3-угольных, но есть хотя бы одна 4-угольная грань; γ – для получения полиэдров, на которых нет 3- и 4-угольных, но есть хотя бы одна 5-угольная грань. При этом из уравнения Эбергардта следует, что в последнем случае на полиэдре существует не менее 12 таких граней. Простейший пример – додекаэдр. Выводя полиэдры вручную, Е.С. Федоров