

УДК 549.51; 549.086

Н.А. Громалова¹, В.Ю. Прокофьев², В.С. Урусов³

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛЕКСАНДРИТЕ УРАЛА, ХРИЗОБЕРИЛЛЕ ТАНЗАНИИ И НЕКОТОРЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ

Приведены результаты сравнительного анализа включений в образцах природного хризоберилла из Танзании и александрита Урала, а также синтетических кристаллов, полученных разными методами синтеза. Показано, что природные кристаллы содержат большое количество твердофазных (хризоберилл, биотит, флюорит, кварц, мусковит, олигоклаз) и газожидких включений. Данные о температуре гомогенизации включений в хризоберилле из Танзании свидетельствуют о том, что минерал формировался в условиях пониженного давления и при участии более высокотемпературных флюидов по сравнению с уральским александритом.

Ключевые слова: хризоберилл, александрит, включения, температура гомогенизации, Танзания, Урал.

The paper presents the results of a comparative analysis of inclusions in the samples of the natural chrysoberyl of Tanzania and the alexandrite of the Urals, as well as synthetic crystals obtained by different methods of synthesis. It is shown that natural crystals contain a large amount of solid phase (chrysoberyl, biotite, fluorite, quartz, muscovite, oligoclase) and gas-liquid inclusions. Data on temperature homogenization in the chrysoberyl (Tanzania) indicate that the mineral was formed in a lower pressure and with participation of a high-temperature fluids in comparison with the Ural alexandrite.

Key words: chrysoberyl, alexandrite, inclusions, temperature of homogenisation, Tanzania, Ural.

Посвящается 100-летию со дня рождения профессора МГУ, создателя термобарогеохимии Н.П. Ермакова

Введение. Хризоберилл (BeAl_2O_4) в природе сравнительно редок. Все известные типы месторождений хризоберилла представляют постмагматические образования, генетически связанные с поздними стадиями пегматитового или различными этапами гидротермально-пневматолитового процесса. Наряду с бериллом и фенакитом хризоберилл присутствует в месторождениях изумрудов «сланцевого» геолого-промышленного типа, например в месторождениях Франкейра (Испания) [Martin-Izard et al., 1995], Изумрудные Копи (Россия) [Власов, Кутукова, 1960], Хабхаталь (Австрия) [Grundmann, Morteany, 1989] и др.

В Изумрудных Копях (Челябинская обл.) выделения хризоберилла приурочены к реакционным зонам десилицированных пегматитов (флогопитовым и хлоритовым), реже хризоберилл встречается в центральных плагиоклазовых частях жил; он ассоциирует с изумрудом, фенакитом, флюоритом, апатитом, молибденитом, турмалином; в зонах десиликации — с маргаритом; александрит приурочен к флогопитовым зонам;

совместно с фенакитом не встречается, сопровождается бериллом и изумрудом [Жернаков, Кайнов, 1993].

В Танзании хризоберилл встречается во всех месторождениях берилла в основном россыпного типа. Месторождения, генетически связанные с гранитными пегматитами, содержат хризоберилл в виде монокристаллов и сростков, что важно для ювелирной промышленности.

Хризоберилл, а особенно его хромсодержащая драгоценная разновидность александрит, очень широко используется в ювелирных изделиях. Кристаллы александрита высоко ценятся из-за редкости, уникальной красоты и разнообразия цветовой гаммы ограненного материала.

С одной стороны, исследование включений дает представление об условиях кристаллизации несущего их минерала, с другой — выявление особенностей природного и синтетического хризоберилла и александрита очень важно для их диагностики, что обусловлено ценовой характеристикой на александрит.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра кристаллографии и кристаллохимии, науч. с.; *e-mail:* gromalnat@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, вед. науч. с.; *e-mail:* vpr2004@rambler.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра кристаллографии и кристаллохимии, заведующий кафедрой, академик РАН; *e-mail:* urusov@enigma.geol.msu.ru

Кристаллы природного хризоберилла и александрита почти всегда содержат многочисленные включения [Минералы, 1967; Gubelin, Koivula, 1992], как правило, это твердые (например, биотита, флогопита) и газо-жидкие включения с разным соотношением газ/жидкость.

В статье представлены результаты сравнительного анализа включений в образцах этого минерала, как полученных разными методами выращивания (из раствора в расплаве, гидротермальным, флюсовым), так и природного происхождения (Урал, Танзания).

Материалы и методы исследований. Нами изучены включения в 17 образцах александрита и хризоберилла, 9 из которых представлены искусственно ограниченными образцами, а 8 — плоскопараллельными пластинами. Образцы александрита из Малышевского рудопроявления (Урал), хризоберилла Танзании и александрита неизвестного генезиса были представлены пластинами, поэтому для них проведены как визуальный анализ с помощью оптической микроскопии, так и исследование методами КР-спектроскопии, растровой электронной микроскопии и термобарогеохимии. Кроме того, визуально (оптическая микроскопия) изучено 9 искусственно ограниченных образцов синтетических и природных кристаллов александрита и хризоберилла.

Микроскопическое изучение и фотографирование выполнено при увеличении 5—50 на микроскопе «Axioptan 2 imaging» («Carl Zeiss») на кафедре минералогии МГУ имени М.В. Ломоносова. Образцы просматривали в проходящем свете.

Включения на растровом электронном микроскопе «Jeol» JSM-6480LV изучали в режиме наблюдения высококонтрастного изображения в отраженных электронах при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка $15 \pm 0,05$ нА в лаборатории локальных методов исследования вещества, кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Индивидуальные включения термобарогеохимически изучали с использованием измерительного комплекса, состоящего из камеры THMSG 600 фирмы «Linkam» (Великобритания), позволяющей проводить измерения в температурном интервале $-196...+600$ °С, с длиннофокусным объективом 80× фирмы «Олимпус» (Япония), установленным на микроскопе «Amplival» (Германия), видеокамеры и управляющего компьютера. Химический состав флюида, захваченного во включениях минералов, оценивали по результатам измерения фазовых переходов и превращений, происшедших при нагревании и охлаждении препаратов. Точность измерений температуры составляет ($\pm 0,2$ °С) в интервале от -20 до $+20$ °С и понижается с удалением от комнатной температуры.

Точность измерения температуры фазовых переходов контролировали периодическим изучением эталонных включений. Состав солей, преобладающих в водных растворах флюидных включений, оценивали

по результатам измерения температуры плавления эвтектики [Борисенко, 1977]. Суммарную концентрацию солей во флюидных включениях определяли по значениям температуры плавления льда на основе экспериментальных данных для системы NaCl—H₂O [Bodnar, Vityk, 1994]. Концентрация солей во включениях с высоким содержанием углекислоты оценивалась по температуре плавления газгидратов [Collins, 1979; Darling, 1991]. Концентрацию солей, плотность и давление флюида определяли с использованием программы «FLINCOR» [Brown, 1989]. Давление рассчитывали по методике, описанной в работе [Прокофьев, Кигаи, 1999].

Результаты исследований и их обсуждение. Оптическая микроскопия. Фазовый состав и характер включений. Ранее нами [Громалова и др., 2006] были приведены результаты первого исследования методом КР-спектроскопии микровключений в уральском александрите с целью идентифицировать их состав. Однофазовые твердые включения представлены двумя минералами — мусковитом и олигоклазом. Позже [Громалова, Урусов, 2011] методом растровой электронной микроскопии было показано, что кристаллы александрита содержат очень разнообразные включения, такие, как хризоберилл, биотит, флюорит, мусковит, кварц. Среди обнаруженных в хризоберилле флюидных включений в соответствии с известными критериями [Реддер, 1987] выделены первичные и вторичные включения. К первым отнесены флюидные включения, которые расположены по зонам роста или равномерно распределены в объеме минерала-хозяина, а ко вторым — приуроченные к секущим трещинам. Состав первичных двухфазовых газо-жидких включений полностью отвечает CO₂, состав трехфазовых — углекислотно-водному [Громалова и др., 2006].

Включения в хризоберилле из Танзании как газо-жидкие, так и твердофазовые. Газо-жидкие включения часто ориентированы в одном направлении, имеют удлиненную форму, размер включений, как правило, составляет до 30 мкм. Включения в танзанийском хризоберилле представляют собой набор капелек неровной формы или с рваными краями, расположенных в нескольких изгибающихся плоскостях — вуалях. Включения являются как первичными, так и первично-вторичными, приуроченными к залеченным трещинам кристалла. Первичные включения «взрывались» в процессе формирования минерала, первично-вторичные представляют собой мелкие капли, так как находившийся в трещине раствор «расшнуровался».

Для синтетического хризоберилла [Громалова и др., 2011] характерны мелкие шарикообразные включения и удлиненные трубкообразные включения, для синтетического александрита — включения флюса, тигля, раскристаллизованного расплава. В александрите, полученном гидротермальным методом синтеза, присутствуют газо-жидкие включения овальной

или, как правило, неправильной формы. В александрите, синтезированном флюсовым методом, включения чаще всего вытянуты в одной плоскости, имеют неправильную и остроугольную форму. Включения в образцах александрита, выращенного методом Чохральского, имеют круглую и колбообразную форму, часто они находятся на разной глубине и «расшнурованы». В этих образцах присутствуют мелкие (до 2 мкм) шарообразные расплавные включения, расположенные без какой-либо закономерности.

Микротермометрические исследования. Александрит (Урал). В ходе эксперимента рассмотрены как газово-жидкие включения, изученные методом КР-спектроскопии в работе [Громалова и др., 2006], так и другие группы включений в этих образцах. По фазовому составу при комнатной температуре включения разделяются на два типа. К типу I отнесены первичные включения групп 1 и 2, а к типу II — включения группы 3 (табл. 1).

1. Газово-жидкие двухфазовые — газ (А) и жидкость (Б), состав полностью отвечает углекислоте (по данным КР-спектроскопии). В этих включениях определена плотность фазы (Б), которая составляет 0,544 г/см³. Исследование 2-й группы включений показало, что в некоторых подобных включениях выявлено присутствие третьей фазы (В) — Н₂О.

2. Газово-жидкие трехфазовые — газ (А), жидкость (Б) и жидкость (В). По составу газовая фаза А отвечает углекислоте, жидкая фаза Б — углекислоте (определено по данным КР-спектроскопии), жидкая фаза В — водному раствору. Солевой состав фазы В по полученным данным отвечает солям хлорида магния и натрия [Борисенко, 1977]. По программе FLINCOR [Brown, 1989] определена концентрация солевого раствора. Она составляет 10,4 мас.%, плотность гомогенного флюида 0,85 г/см³.

3. Газово-жидкие двухфазовые — газ (А), жидкость (Б). Данные термобарогеохимии свидетельствуют о наличии в растворе включений хлоридов магния, калия и, возможно, натрия [Борисенко, 1977]. По про-

грамме FLINCOR определена концентрация солевого раствора, которая составляет 3,6 мас.%, плотность гомогенного флюида 0,83 г/см³.

Давление (*P*) определялось для гетерогенных флюидов (т.е. для групп сингенетичных углекислотно-водных и существенно газовых включений (по 1-й и 2-й группе включений, образец Пл. 1) по пересечению изохоры и изотермы [Калужный, 1982], с использованием программы FLINCOR и методики, приведенной в работе [Прокофьев, Кигаи, 1999]:

$$P = 668 \text{ бар} + (P_{\text{вод. пар}} = 72 \text{ бар}) = 740 \text{ бар}.$$

Микротермометрические данные представлены в табл. 1.

Александрит неизвестного генезиса. Были изучены газово-жидкие включения в двух пластинах александрита. По фазовому составу при комнатной температуре включения разделены на два типа (рис. 1).

К I типу отнесены трехфазовые углекислотно-водные флюидные включения, содержащие жидкую (А) и газообразную СО₂ (Б) фазы, а также жидкую воду (В) (рис. 1, а). Большинство флюидных включений имеет размер от 40 до 10 мкм и форму отрицательных кристаллов. По данным изучения 31 индивидуального флюидного включения (табл. 2), температура гомогенизации первичных флюидных включений I типа в александрите составляет 288 °С. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа составляет 8,4 мас.%-экв. NaCl. Концентрация углекислоты в рудообразующем флюиде равна 4,8 моль/кг раствора (плотность флюида 0,91 г/см³). Судя по величине температуры эвтектики (–30 °С), в минералообразующем флюиде среди солей преобладают хлориды натрия и магния. Для мелких флюидных включений в образце № 2 (рис. 1, б) определены только значения температуры гомогенизации. По этим параметрам они обнаруживают сходство с вышеописанными включениями I типа (А — жидкая углекислота, Б — газообразная углекислота, В — жидкая вода).

Двухфазовые флюидные включения (тип II) приурочены к секущим трещинам в хризоберилле. Вто-

Таблица 1

Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в александрите Урала

Номер образца	Характер включения	Тип	n	Температура, °С					C _{солей} , мас. %-экв. NaCl	d, г/см ³	P, бар
				гомогенизации	эвтектики	плавления льда	плавления СО ₂	гомогенизации СО ₂			
Пл. 1	1. Газово-жидкое двухфазовое (СО _{2г} , СО _{2ж})	П	4	—	—	—	–58,4	30,8	—	0,54	740
	2. Газово-жидкое трехфазовое (СО _{2г} , СО _{2ж} , хлориды Mg, NNa)	П	6	292	–35	–6,9	–57,1	30,5	10,4	0,85	
Пл. 2	3. Газово-жидкое двухфазовое (хлориды Mg, K, NNa(?))	В	4	250	–44	–2,2	—	—	3,6	0,83	—

Примечания. П — первичные включения, В — вторичные включения, n — число изученных включений, C — концентрация, d — плотность флюида, P — давление, — — не определен.

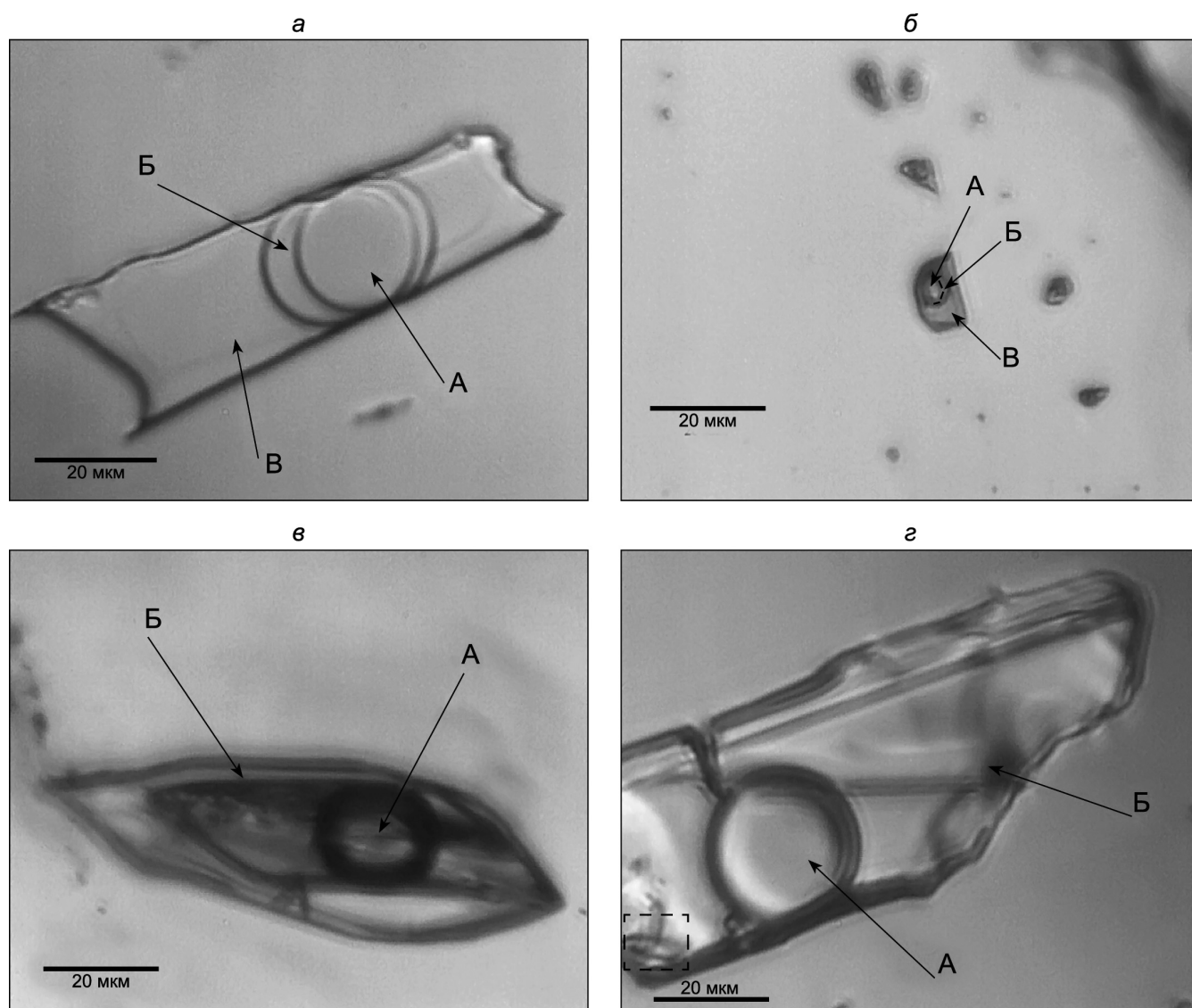


Рис. 1. Газово-жидкие включения в александрите неизвестного генезиса: а, б — первичные углекислотно-водные (А — CO_{2г}, Б — CO_{2ж}, В — водно-солевой раствор); в, г — вторичные (А, Б — водно-солевой раствор)

ричные флюидные включения II типа (рис. 1, в, г) в александрите гомогенизируются в жидкость при температуре $240 \pm 1^\circ\text{C}$ (табл. 2). Температура эвтектики находящегося в них раствора составляет -8°C , что свидетельствует о преобладании в составе водно-со-

левого флюида хлоридов калия и магния (фазы А и Б на рис. 1, в, г). Концентрация солей, оцененная по температуре плавления льда, изменяется от 2,9 до 3,1 мас.%-экв. NaCl. Плотность этих флюидов $\geq 0,84 \text{ г/см}^3$. Иногда в этих включениях отмечается

Таблица 2

Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в александрите неизвестного генезиса

Номер образца	Тип включения	n*	Температура, °C						C _{солей} , мас.%-экв. NaCl	C _{CO₂} , моль/кг раствора	C _{CH₄} , моль/кг раствора	d, г/см ³
			гомогенизации	эвтектики	плавления льда	плавления CO ₂	гомогенизации CO ₂	плавления газгидрата				
1	П (рис. 1, а)	13	288	-30	-7,1	-57,9	30,3	8,3	8,4	4,8	0,9	0,91
	В (рис. 1, в)	5	240	-8	-1,7	—	—	—	2,9	—	—	0,84
	В (рис. 1, г)	7	239	-8	-1,8	—	—	—	3,1	—	—	0,84
2	П (рис. 1, б)	6	288	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	8,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.

* См. примечания к табл. 1.

Т а б л и ц а 3

**Результаты термо- и криометрических исследований
индивидуальных флюидных включений в хризоберилле из Танзании**

Номер образца	Тип включений	n	Температура, °С						C _{солей} , мас.%-экв. NaCl	C _{CO₂} , моль/кг раствора	C _{CH₄} , моль/кг раствора	d, г/см ³	P, бар	P _{общ} /P _{H₂O}
			гомогенизации	эвтектики	плавления льда	плавления CO ₂	гомогенизации CO ₂	плавления газ-гидрата						
3	2	10	359 Г	-30	-4,6	-58,6	21,5 Г	10,2	5,4	5,9	0,6	0,66	420	2,3

Примечания. 2 — газовые включения, n — число исследованных включений, Г — гомотенизация углекислоты в газовую фазу, C — концентрация, d — плотность флюида, P — давление.

появление третьей фазы — твердой (рис. 1, з, область, содержащая минерал, выделена прямоугольником).

Концентрацию солей во включениях с высоким содержанием углекислоты (I тип) оценивали по значениям температуры плавления газгидратов [Collins, 1979; Darling, 1991]. Концентрацию солей, плотность и давление флюида определяли с использованием программы FLINCOR. Суммарную концентрацию солей во флюидных включениях II типа устанавливали по температуре плавления льда на основе экспериментальных данных для системы NaCl—H₂O [Bodnar, Vityk, 1994]. Данные термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений представлены в табл. 2.

Хризоберилл (Танзания). По данным изучения 10 индивидуальных флюидных включений (табл. 3) температура гомотенизации существенно газовых включений в хризоберилле из Танзании (рис. 2) равна 359 °С, температура плавления CO₂ — 58,6 °С, что указывает на примесь низкокипящих газов, вероятнее всего метана. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа составляет 8,4 мас.%-экв. NaCl, концентрация углекислоты в рудообразующем флюиде — 5,9 моль/кг раствора (плотность флюида 0,66 г/см³). Судя по величине температуры эвтектики (-30 °С), в минералообразующем флюиде среди солей преобладают хлориды натрия и магния. Давление составляет



Рис. 2. Углекислотные газовые включения в хризоберилле из Танзании

420 бар, что существенно ниже давления, определенного для гетерогенного флюида уральского александрита (740 бар).

Выводы. 1. Методами КР-спектроскопии и термобарогеохимии в природных образцах александрита (Урал) установлены газовой-жидкие (двух- и трехфазовые) углекислотные и углекислотно-водные включения, а также твердофазные включения, представленные олигоклазом и мусковитом. Для александрита (Урал) методом РЭМ установлены включения хризоберилла, биотита, флюорита и кварца [Громалова, Урусов, 2011]. Практически все включения окружены темной каймой хризоберилла, это свидетельствует о том, что в этой области снижено содержание железа и хрома. Изученные кристаллы различны по микроморфологии и имеют разный состав включений. Наличие углекислых газовой-жидких включений указывает на кристаллизацию минерала при участии флюида H₂O—CO₂ с относительно высокой плотностью, а включений мусковита и олигоклаза — что кристаллы хризоберилла при росте захватывали минералы вмещающих пород.

2. По данным термобарогеохимии природного александрита (Урал), температура гомотенизации первичных газовой-жидких включений составляет 292 °С, температура плавления CO₂ варьирует от -57 до -58 °С, что указывает на примесь низкокипящих газов, вероятнее всего метана. Данные о температуре гомотенизации включений в александрите (Урал) свидетельствуют о том, что минерал формировался при участии среднетемпературных низкосолёных флюидов [Долгова и др., 2005]. Включения в образцах александрита неизвестного генезиса (пластины) преимущественно газовой-жидкие (температура гомотенизации первичных флюидных углекислотно-водных включений составляет 288 °С), присутствуют также трехфазовые включения с захваченной твердой фракцией (минералом).

3. Данные о температуре гомотенизации включений в хризоберилле из Танзании свидетельствуют о том, что минерал формировался в условиях более низкого давления и при участии более высокотемпературных флюидов по сравнению с уральским александритом и образцами александрита неизвестного генезиса.

4. Для большинства ограненных изученных образцов получены ожидаемые результаты. Для природных образцов характерны как газово-жидкие (первичные и вторичные), так и твердофазные включения. Включения в александрите и хризоберилле из Урала и Танзании различаются. Включения в танзанийских образцах ориентированы в одном направлении. Первичные включения в танзанийских образцах, в отличие от уральского александрита, «взрывались» в процессе формирования минерала, а вторичные представляют мелкие капли, так как находившийся в трещине раст-

вор растекся, они имеют направленное распределение, их размеры крупнее, чем у уральских. Для образцов александрита, синтезированного гидротермальным методом, характерны газово-жидкие включения, для образцов, полученных флюсовым методом, — крупные включения флюса неправильной формы, распределенные в одной плоскости. Александрит, выращенный методом Чохральского, характеризуется шарообразными мелкими включениями стекла (до 2—3 мкм), распределенными в кристалле без какой-либо закономерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16—27.
- Власов К.А., Кутукова Е.И.* Изумрудные Копи. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
- Громалова Н.А.* Исследование включений в хризоберилле Изумрудных Копей Урала методами КР-спектроскопии и микротермометрии // Тез. докл. VIII Междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле». Т. 3. М., 2007. С. 100—102.
- Громалова Н.А., Дорохова Г.И., Вигасина М.Ф.* КР-спектроскопия включений в хризобериллах из Изумрудных Копей Урала // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2006. № 2. С. 64—67.
- Громалова Н.А., Еремин Н.Н., Дорохова Г.И., Урусов В.С.* Морфология синтетических кристаллов хризоберилла и александрита: анализ экспериментальных данных и теоретическое моделирование // Кристаллография. 2012а. Т. 57, № 3. С. 563—570.
- Громалова Н.А., Мальцев В.В., Дорохова Г.И.* и др. Перекристаллизация природного хризоберилла в многокомпонентных расплавах // Кристаллография. 2012б. Т. 57, № 3. С. 557—562.
- Громалова Н.А., Урусов В.С.* Хризоберилл и его драгоценная разновидность — александрит. Раствор-расплавная кристаллизация и комплексное исследование состава, кристалломорфологии и свойств натуральных и синтетических кристаллов. L.: GmbH Lambert Academic Publishing, 2011. 262 p.
- Долгова О.С., Громалова Н.А., Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю.* Сравнительная характеристика хризобериллов Малышевского и Липовского месторождений, Средний Урал, Россия // Докл. Уральской летней минералогической школы-05. Екатеринбург, 2005. С. 20—27.
- Жернаков В.И., Кайнов В.И.* Хризоберилл // Горный журн. 1993. № 4. С. 122—125.
- Минералы: Справочник. Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты, гидроксилы. Т. 2, вып. 3. М.: Наука, 1967. 675 с.
- Калюжный В.А.* Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наукова думка, 1982. 238 с.
- Прокофьев В.Ю., Кугай И.Н.* Практическая термобарогеохимия. Современные методы изучения флюидных включений в минералах. М.: ИГЕМ РАН, 1999. 64 с.
- Реддер Э.* Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987.
- Bodnar R.J., Vityk M.O.* Interpretation of microthermometric data for H₂O—NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignano: Siena, 1994. P. 117—130.
- Brown P.* FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Am. Mineral. 1989. Vol. 74. P. 1390—1393.
- Collins P.L.F.* Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity // Econ. Geol. 1979. Vol. 74, N 6. P. 1435—1444.
- Darling R.S.* An extended equation to calculate NaCl contents from final clatrate melting temperatures in H₂O—CO₂—NaCl fluid inclusions: Implications for P—T isochore location // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1991. Vol. 55. P. 3869—3871.
- Grundmann G., Morteau G.* Emerald mineralization during regional metamorphism: The Habachtal (Austria) and Leydsdorp (Transvaal, South Africa), deposits // Econ. Geol. 1989. Vol. 84. P. 1835—1849.
- Gubelin E.J., Koivula J.I.* Photo atlas of inclusions in Gemstones. Zurich: ABC Edition, 1992. P. 265—267, 456.
- Martin-Izard A., Panigua A., Moreieras D.* et al. Metasomatism at a granitic pegmatite — dunite contact in Galicia: the Franqueira occurrence of chrysoberyl (alexandrite), emerald and phenakite // Can. Mineral. 1995. Vol. 33, pt. 4. P. 775—793.

Поступила в редакцию
24.04.2013