

Гордиенко В. В. Гранитные пегматиты (рудные формации, минералого-геохимические особенности, происхождение, поисково-оценочные критерии). СПб.: СПбГУ, 1996. 272 с.

Гордиенко В. В., Пономарева Н. И. Распределение свинца между сосуществующими калиевым полевым шпатом и плагиоклазом как диполовошпатовый геотермометр // Доклады академии наук, 1994. Т. 338. № 2. С. 205–206.

Seppo I. L., Kari A. K. A new gem locality Luumaki, Finland / Notes and new techniques, 1993. Vol. 29. № 1. P. 30–37.

*А. С. Дмитриева*  
*Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск*  
*annadel@inbox.ru*

**Условия образования турмалиновой минерализации в пегматитовых жилах Малханского месторождения, Восточное Забайкалье**  
(научный руководитель В. Е. Загорский)

Целью настоящей работы является реконструкция условий образования турмалиновой минерализации в миароловых пегматитах Малханского поля на основе изучения флюидных включений (ФВ) в турмалине. В пределах поля, являющегося одним из крупнейших источников драгоценного турмалина в Евразии, наибольший интерес представляют высокопродуктивные жилы Моховая, Орешная, Соседка, Октябрьская, Западная-1 и некоторые другие. Наиболее весомый вклад в изучение и освоение Малханского месторождения самоцветов внесли геологи экспедиции «Байкал-кварцсамоцветы» и ЗАО «Турмалхан» В. Е. Кушнарев, А. Д. Сотников, В. И. Беляевский, а также сотрудники ИГХ СО РАН В. Е. Загорский и И. С. Перетяжко.

Геология, минералогия и геохимия пегматитов Малханского поля освещены в работах [Загорский, Перетяжко, 1992; 2008]. Условия образования полостей наиболее детально проанализированы на примере одной из миарол в жиле Октябрьская [Peretyazhko et al., 2004].

Богатые турмалином жилы сложены кварц-полевошпатовой матрицей графической, пегматоидной и блоковой структур, вмещающей многочисленные миаролы. Последние часто окружены комплексами непостоянного состава, сложенными лепидолитом, цветным турмалином, альбитом, петалитом. Околомиароловые комплексы сформировались на позднемагматическом этапе, тогда как минералообразование в миаролах соответствует гидротермальному этапу. Соседние, изолированные друг от друга миаролы часто разительно отличаются по составу друзовых парагенезисов и рыхлого материала их заполнения. Наряду с богатыми турмалином полостями, присутствуют миаролы, в которых борная минерализация представлена аксинитом, а также «кварцевые» (без минералов бора) миаролы.

Для кристаллов турмалина характерна продольная и концентрическая зональность (от ранних зон к поздним): черные шерлы → коричневые, желтые, салатовые Mn-Li-Al-турмалины → розовые, вишневые, светло-зеленые Li-Al-турмалины → темно-зеленые (до почти черных) Mn-Fe-содержащие Li-Al-турмалины.

Ниже представлены результаты изучения первичных ФВ в цветных турмалинах из нескольких высокопродуктивных жил (коллекция В. Е. Загорского). В работе использован измерительный комплекс на основе поляризационного микроскопа ПОЛАМ Р-311, термокамеры конструкции Базарова с точностью определения температуры гомогенизации ( $\pm 5$  °С) и криокамеры конструкции В. А. Симонова, температура в которой измерялась при помощи хромель-копелевой термопары, подключенной к цифровому вольтметру (точность  $\pm 0.01$  mV). При интерпретации результатов использованы экспериментальные и расчетные данные для систем  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  и  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{H}_3\text{BO}_3$  [Bodnar, Vityk, 1994; Peretyazhko et al., 2004].

В турмалинах преобладают первичные ФВ, содержащие борнокисло-водный раствор и газовый пузырек (1 тип). Более редки включения с твердыми фазами. К ним относятся ФВ с кристаллами борной кислоты – сассолина (2 тип) или неидентифицированными анизотропными фазами ( $\pm$  сассолин) (3 тип). Все три типа ФВ обычно встречаются совместно и являются сингенетичными. Размеры включений варьируют от 15 до 70 мкм; для них характерны трубчатые и неправильные формы, иногда с элементами индукционных граней. В турмалинах из околониароловых комплексов преобладают ФВ 1 типа, в турмалинах из миарол количества включений разных типов близки. От ранних к поздним зонам кристаллов количество ФВ уменьшается, а их форма становится более сложной.

Криометрические исследования показали, что растворы ФВ замерзают в широком диапазоне температур. Плавление последних кристалликов льда происходит в интервале от  $-2$  до  $-6.4$  °С. Значительные вариации температур эвтектик ( $-28$  ÷  $-48$  °С) косвенно свидетельствуют о непостоянстве состава захваченных растворов. По данным определения состава растворов ФВ стандартным методом водных вытяжек главными катионами являются  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , в меньших количествах устанавливаются  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . В анионной составляющей обнаружены  $\text{HCO}_3^{3-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ . Борная кислота, являющаяся одним из важнейших компонентов растворов, надежно диагностируется методом КР-спектроскопии. Методом ICP-MS определен более широкий круг элементов. Так, содержания Li в турмалинах достигают 7350 мкг/л, В – 12080 мкг/л, Ti – 200 мкг/л. Кроме того, в существенных количествах установлены и другие элементы: Bi (до 180 мкг/л), Ga (до 70 мкг/л), Pb (до 40 мкг/л). Из летучих компонентов, наряду с бором, этим методом обнаружены также S (до 380 мкг/л) и P (до 70 мкг/л).

Общая *соленость растворов* во ФВ варьирует от 2 до 11 мас. % NaCl-экв. Наблюдается тенденция роста солёности от ранних (желтых) к поздним образцов. *Концентрации  $\text{H}_3\text{BO}_3$*  во флюидах разных жил, в том числе в одинаково окрашенных зонах турмалина, также варьируют весьма существенно – от 3.5 до 24 мас. % (табл., рис. 1). Происходит некоторое снижение содержаний  $\text{H}_3\text{BO}_3$  по мере перехода

от ранних к поздним зонам турмалинов. В целом, растворы ФВ обычно в большей степени обогащены борной кислотой, чем солевыми компонентами. Повышенные содержания  $\text{H}_3\text{BO}_3$  характерны для жилы Западная-1.

Гомогенизация включений происходит в жидкую фазу, в единичных случаях с критическими явлениями. *Температуры гомогенизации ( $T_{\text{hom}}$ )* варьируют от 80–120 до 320–350 °С, но наиболее характерен диапазон 250–330 °С. Значительное перекрытие интервалов  $T_{\text{hom}}$  ФВ из турмалинов разных пегматитовых тел (рис. 1) свидетельствует о близости температурных условий их образования. При этом концентрация  $\text{H}_3\text{BO}_3$  не оказывает существенного влияния на температуру гомогенизации ФВ.

Т а б л и ц а

## Характеристики флюидных включений в турмалинах

Жилы	Турмалин	Тип ФВ(п)	Температура, °С			C <sub>NaCl-экв.</sub> , мас. %	C <sub>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></sub> , мас. %	D, г/см <sup>3</sup>	P, кбар	
			T <sub>ice</sub>	T <sub>sat.</sub>	T <sub>hom.</sub>					
Соседка	розовый	1 (29)	-5.8-6.4		120-340 (265)	6.3-11.0		0.84-0.94	2.4-4.5	
		2 (4)	-4.6-5.2	10-42	285-325 (300)	6.5-7.0	3.5-8.0	0.71	2.0	
		3 (2)	-5.0-6.4	43	120-210 (170)	7-9.7.0	8.0	0.95	3.6	
	буро-зеленый	1 (29)	-5.0-6.2		260-350 (330)	8.0-9.5		0.75-0.77	1.64-1.8	
		2 (9)	-5.3-6.0	37-47	315-340 (330)	7.4-8.5	7.0-9.0	0.65-0.70	1.5-1.84	
		3 (10)	-4.4-6.1	42-48	300-370 (335)	7.0-9.3	7.4-8.8	0.70-0.77	1.5-1.82	
Орешная	желтый	1 (3)			300-303					
		2 (6)	-2.3-3.4	46-55	297-302 (300)	3.0-4.4	9.0-11	0.75-0.76	2.2	
		3 (3)	-2.7-3.7	45-56	292-301 (297)	3.4-5.0	8.6-9.0	0.75-0.77	2.3	
	розовый	1 (2)	-3.5		280-300 (290)	5.7		0.78	2.0	
		2 (7)	-1.8-3.8	39-52	290-335 (305)	2.0-5.2	7.5-9.0	0.66-0.74	2.1	
		3 (4)	-2.4-3.4	34-38	250-315 (290)	3.8-5.0	6.7-7.3	0.79	2.5	
Моховая	розовый (комплекс)	1 (25)	-3.0-5.6		220-370 (310)	5.0-8.7		0.74-0.86	1.8-2.7	
		2 (7)	-2.6-4.0	26-50	240-320 (300)	3.4-5.6	5.2-10	0.70-0.84	1.9-3.5	
		3 (11)	-3.0-6.2	33-40	220-350 (305)	4.0-9.5	6.4-7.4	0.70-0.85	1.7-3.2	
	розовый (миаролы)	1 (9)	-1.7-2.7		260-325 (280)	2.9-4.5		0.70-0.78	1.7-2.4	
		2 (4)	-1.8-2.5	44-49	310-320 (315)	2.0-3.0	8.8-10	0.7	1.8	
		3 (4)	-2.0-2.9	61	290-320 (305)	2.8-4.8	12.7	0.72-0.77	1.8-2.1	
Западная-1	желтый	1 (3)	-3.7-4.7		95-110 (100)	6.0-7.5		1.0	2.4-2.7	
		2 (2)	-3.6-4.0	90-94	100-300 (200)	4.3-5.0	22-24	0.92	1.75	
		3 (2)	-3.8-4.5		260-280 (270)	6.2-7.2		0.82-0.84	2.4-2.7	
	розовый	1 (6)	-4.0-5.8		100-280 (210)	6.5-9.0		0.84-0.96	2.6-4.1	
		2 (1)	-5.1	92	240	6.2	22.0	0.9	3.5	
		3 (4)	-4.7-5.9	90	130-250 (200)	7.0-7.4	21.0	0.88-0.93	3.2-3.7	
	зеленый	1 (2)	-4.2		100-130 (115)	6.7		0.98	2.1	
		3 (1)	-5.3		115	8.3		1.0	2.3	
	Октябрьская	желтый	2 (7)	-1.8-2.5	61-70	296-302 (300)	2.0-3.0	13-15.5	0.77	2.2
розовый			1 (2)			220-250 (235)				
			2 (3)	-5.2	60-95	190-285 (250)	7.0	13.5	0.93	4.8
		3 (5)	-4.8-5.0	71-96	280-390 (290)	6.0-6.6	15-20	0.74	2.2	
зеленый		1 (6)	-4.3-5.1		80-240 (180)	7.0-8.0		0.90-0.98	3.4-4.4	
		2 (3)	-4.6	60-90	105-245 (220)	6.3	11.6	0.85	3.4	
	3 (3)	-4.0-5.1	50-73	200-240 (220)	5.6-7.0	10-15	0.87-0.92	3.9-4.5		

Примечание к табл.  $n$  – количество ФВ;  $T_{ice}$ ,  $T_{sas}$ ,  $T_{hom}$  – температуры плавления льда, растворения сассолина и гомогенизации, соответственно (в скобках среднее);  $C_{NaCl-экв.}$  – соленость флюида;  $C_{H_3BO_3}$  – концентрация борной кислоты;  $D$  – плотность флюида;  $P$  – давление флюида при температуре 500 °С, рассчитанное с учетом влияния  $H_3BO_3$  по следующим формулам [Peretyazhko et al., 2004]:  $P = P_{1-v} + (300 - T_{hom})dP/dT_{100-300\text{ °C}} + (T - 300)dP/dT_{300-500\text{ °C}}$  (если  $T_{hom} < 300\text{ °C}$ ) и  $P = P_{1-v} + (T - T_{hom})dP/dT_{300-500\text{ °C}}$  (если  $T_{hom} > 300\text{ °C}$ ). Здесь  $T$  – это температура, для которой рассчитано давление;  $P_{1-v}$  – давление в момент гомогенизации;  $dP/dT$  – поправка к температуре для интервала  $T_{hom}$ , равного либо 100–300 °С, либо 300–500 °С.

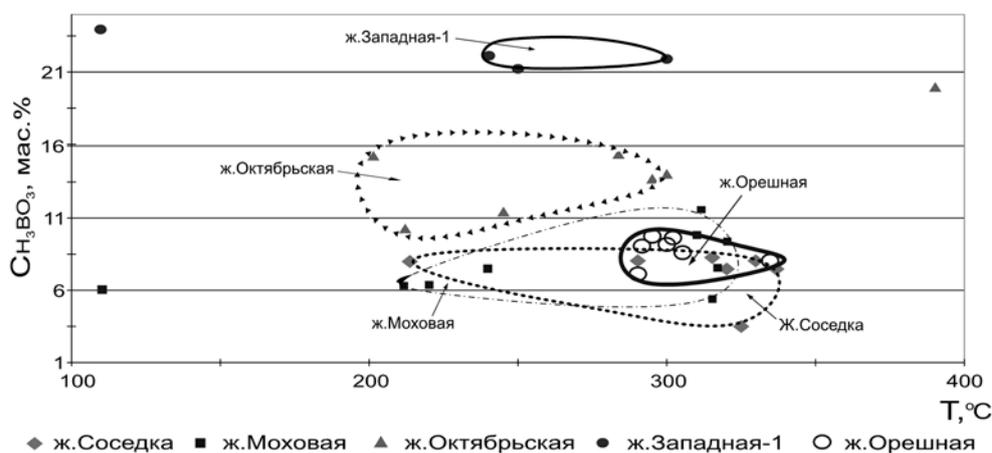


Рис. 1. Содержание борной кислоты в растворе и температура гомогенизации флюидных включений в турмалинах из разных жил Малханского месторождения.

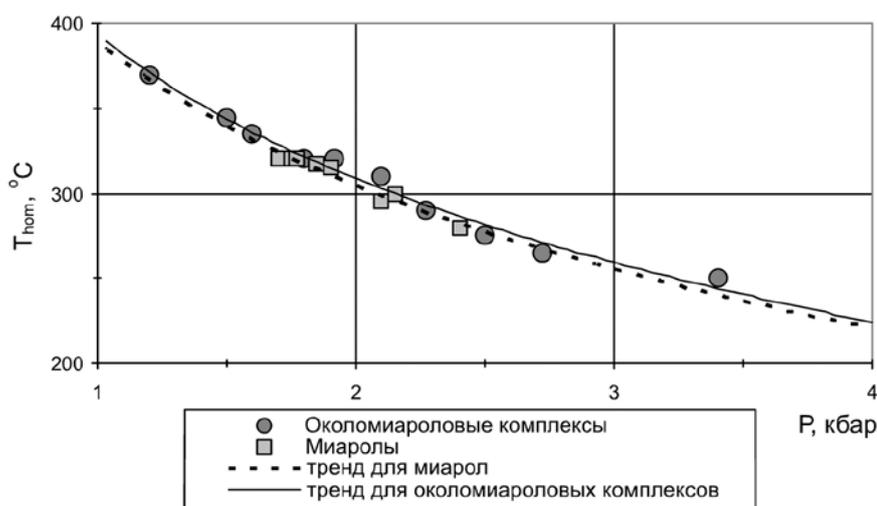


Рис. 2. Зависимость температур гомогенизации и флюидного давления в турмалинах из околомиароловых комплексов и миарол жилы Моховая.

*Плотность* флюида определялась с учетом солености и концентрации  $\text{H}_3\text{BO}_3$  [Наумов, 1982]. Ее значения в разных телах достаточно близки – 0.7–1 г/см<sup>3</sup> (табл.). Расчетные данные по *давлению флюида* приведены для изотермы 500 °С, поскольку при этой температуре начинается плавление редких расплавных включений в корневых частях кристаллов кварца, растущих на стенках миарол [Peretyazhko et al., 2004], что позволяет принять ее в качестве начальной для гидротермального этапа минералообразования в миаролах. Расчетные значения флюидного давления для начала гидротермального этапа варьируют от 1.5 до 4.5 кбар, но наиболее характерен для изученных жил интервал 1.3–2 кбар (табл.). Концентрация  $\text{H}_3\text{BO}_3$  оказывает заметное влияние на флюидное давление [Peretyazhko et al., 2004]. Значения давления в турмалинах из околومیароловых комплексов и в кристаллах из миарол в начале гидротермального этапа очень близки (рис. 2). Несколько повышенные давления флюида установлены для розовых турмалинов по сравнению с другими генерациями минерала в большинстве жил, а также для турмалинов жилы Октябрьская в целом.

### Выводы

1. Турмалины Малханского пегматитового поля образуются при активном участии высококонцентрированных борнокисло-водных растворов, содержащих также существенные количества других элементов (Mn, Li, Al, Fe, B, Ti, Bi, Ga, Pb).

2. Несмотря на значительные вариации концентраций  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , солености растворов, температур гомогенизации включений и максимального давления флюида, рассчитанного для начала гидротермального этапа, условия образования турмалина в разных жилах существенно не различаются.

Дальнейшие исследования предполагают сравнительный анализ имеющихся термобарогеохимических данных для широкого круга минералов из пегматитов Малхана; в том числе из миарол, резко отличающихся по характеру минерализации.

### Литература

Загорский В. Е., Перетяжко И. С. Малханское месторождение турмалина в Забайкалье // Минералогический Альманах. М.: ООО «Альтум», 2008. Вып. 13б. С. 4–39.

Загорский В. Е., Перетяжко И. С. Пегматиты с самоцветами Центрального Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1992. 224 с.

Наумов В. Б. Возможности определения давления и плотности минералообразующих сред по включениям в минералах // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М.: Недра, 1982. С. 85–94.

Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data / In: de Vivo B. and Frezzotti M. L. (eds). Fluid inclusions in minerals: Methods and Applications. Pontignano; Siena, 1994. P. 117–130.

Peretyazhko I. S., Zagorsky V. Y., Smirnov S. Z., Mikhailov M. Y. Conditions of pocket formation of the Oktyabrskaya tourmaline-rich gem pegmatite (Malkhan field) // Chemical Geology, 2004. V. 210. P. 91–111.