

УДК 549.623.5

© Д. чл. В. Б. САВЕЛЬЕВА, * д. чл. Е. П. БАЗАРОВА, * С. В. КАНАКИН**

МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ КВАРЦ-ТУРМАЛИНОВЫХ ШЛИРОВ В ГРАНИТАХ ПРИМОРСКОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

* Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128;
e-mail: vsavel@crust.irk.ru

** Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6 а;
e-mail: scan_61@mail.ru

Кварц-турмалиновые шлиры обнаружены в биотитовых лейкогранитах раннепротерозойского приморского комплекса в Западном Прибайкалье. Шлиры сложены кварцем и турмалином с реликтами полевых шпатов; в них присутствуют также флюорит, редкие зерна мусковита и хлорита и акцессорные рутил, ильменит, циркон, монацит, ксенотим и бастнезит. Содержания B_2O_3 в шлирах 2.29—2.63 мас. %, F 0.30—0.47 мас. %. По сравнению с гранитами в шлирах выше содержания Fe_2O_3 (4.8—5.4 мас. %), F, H_2O и ниже SiO_2 , CaO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 , а также отношение K_2O/Na_2O . Обогащенность шлиров, наряду с B, F, H_2O и Na, железом и рудными элементами (Zn, Sc, Co, Cu, Sn и др.), позволяет предполагать, что их образование происходило из флюидного расплава, отделившегося от алюмосиликатного расплава в апикальной части малоглубинной интрузии.

Ключевые слова: турмалин, бор, граниты, флюид.

V. B. SAVELYEVA, E. P. BAZAROVA, S. V. KANAKIN. MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF QUARTZ-TOURMALINE SCHLIEREN IN GRANITES OF PRIMORSKY COMPLEX IN THE WESTERN BAIKAL REGION

Quartz-tourmaline schlieren have been found in rapakivi-like granites of the Early Proterozoic Primorsky complex in the Western Baikal region. In general, host rocks are presented by biotite leucogranites of normal alkalinity and aluminiferousity ($A/CNK = 1.00—1.04$), with high ferruginosity ($f = 92—95\%$), the K_2O/Na_2O ratio about 2.0, and with relatively high F, Li, Rb, Cs, Sn, Pb, Th, U contents and low Ba, Sr, Eu, Zn, Sc and V contents. Schlieren are composed of quartz and tourmaline with relicts of feldspar; they contain also fluorite, rare grains of muscovite and chlorite and accessory rutile, ilmenite, zircon, monazite, xenotime and bastnasite. Contents of B_2O_3 in schlieren make 2.29—2.63 wt %, and F 0.30—0.47 wt %. Contents of Fe_2O_3 (4.8—5.4 wt %), F, H_2O are higher in schlieren as compared with host granites, and contents of SiO_2 , CaO, Na_2O , K_2O and P_2O_5 are lower than in host rocks. The K_2O/Na_2O ratio decreases in schlieren down to 0.4. Enrichment of schlieren, together with B, F, H_2O , Na, in iron and other ore elements (Zn, Co, Cu, Sn, etc.) allows assuming that they were crystallized from some fluid melt segregated from general alumino-silicate melt at the apical part of a shallow-crystallized intrusion. Formation of tourmaline may be connected with interaction of the melt-liquid with feldspars of crystallized granites; it was accompanied by separation of a fluorine carbonaceous fluid. The quartz crystallization took place at the next stage, following the acidic character of water fluid. In general, the mineral relationship in schlieren indicates a distinct fractionation of light and heavy REE and Y in the fluid melt.

Key words: tourmaline, boron, granites, fluid.

Бор наряду с другими летучими компонентами играет важную роль в процессах гранито- и пегматитообразования, снижая температуру солидуса гранитного расплава, уменьшая вязкость расплава и повышая растворимость воды в расплаве (Pichavant, Manning, 1984; London et al., 1996; Перетяжко, 2000; Баданина, 2003, и др.). Главным минералом-концентратором бора в гранитах и показателем повышенного содержания бора в расплаве является турмалин. Однако магматический турмалин в общем случае характерен только для гранитов S-типа и обычно отсутствует в нормально глиноземистых и слабо пересыщенных глиноземом ($ASI < 1.2$) гранитах (London et al., 1996; Wolf, London, 1997), к каковым, в частности, относятся рапакиви и рапакивиподобные граниты. Особенностью рапакиви-гранитных комплексов является обогащенность F, что находит отражение в генетической связи с ними топазовых грейзенов, интрузий литий-фтористых гранитов, онгонитов; турмалин же в этих гранитах встречается только как акцессорный минерал (Великославинский и др., 1978; Шаталов, 1991; Naapala, Lukkari, 1995; Граменицкий и др., 1998; Dall'Agnol et al., 2005). В то же время рапакиви и рапакивиподобные граниты нередко содержат превышающие кларк концентрации бора (Таусон и др., 1984). Нами кварц-турмалиновые обособления (шлиры) обнаружены в рапакивиподобных гранитах приморского комплекса PR₁ в Западном Прибайкалье.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Граниты приморского комплекса слагают ряд массивов общей протяженностью свыше 200 км и шириной до 20 км в южной части Сибирского кратона, вдоль западного берега оз. Байкал (рис. 1, а). На большей части территории граниты имеют тектонические или интрузивные контакты с метаморфическими породами сарминской серии раннего протерозоя; на юго-востоке они граничат по зоне Приморского разлома с раннепалеозойскими метаморфическими образованиями, на северо-западе трансгрессивно перекрыты отложениями чехла Сибирской платформы.

В составе комплекса выделяются две интрузивные фазы. Породы первой фазы представлены крупноовоидными, порфировидными и равномернозернистыми биотитовыми и биотит-амфиболовыми гранитами; породы второй фазы — мелко- и среднезернистыми биотитовыми гранитами и аплитами. Возрастные датировки гранитов составляют 1.86—1.91 млн лет (Бибикова и др., 1981; Донская и др., 2005).

Породы комплекса относятся к известково-щелочной серии и образуют ряд от гранодиоритов до нормальных и субщелочных лейкогранитов. В целом породы характеризуются высоким содержанием K_2O (4.5—5.5 мас. %) и железистостью [$FeO_{общ}/(FeO_{общ} + MgO) > 0.8$], повышенными концентрациями F, Ba, Pb, Zr, PЗЭ, Th, Zn, Cu, Sc, Sn и Be (Петрова и др., 1997; Донская и др., 2005; Савельева, Базарова, 2012). Среднее содержание В в гранитах первой фазы составляет 22 г/т, второй фазы — 34 г/т (Брынцев и др., 1984). По петрохимическим особенностям и составу минералов граниты комплекса сходны с типичными рапакиви (Великославинский и др., 1978), но отличаются от них по структурному положению и отсутствию связей с габбро и анортозитами, вследствие чего названы рапакивиподобными (Брынцев и др., 1984).

Турмалин является распространенным минералом в северо-восточной части выходов гранитов: в Трехголовом массиве и его экзоконтактной зоне

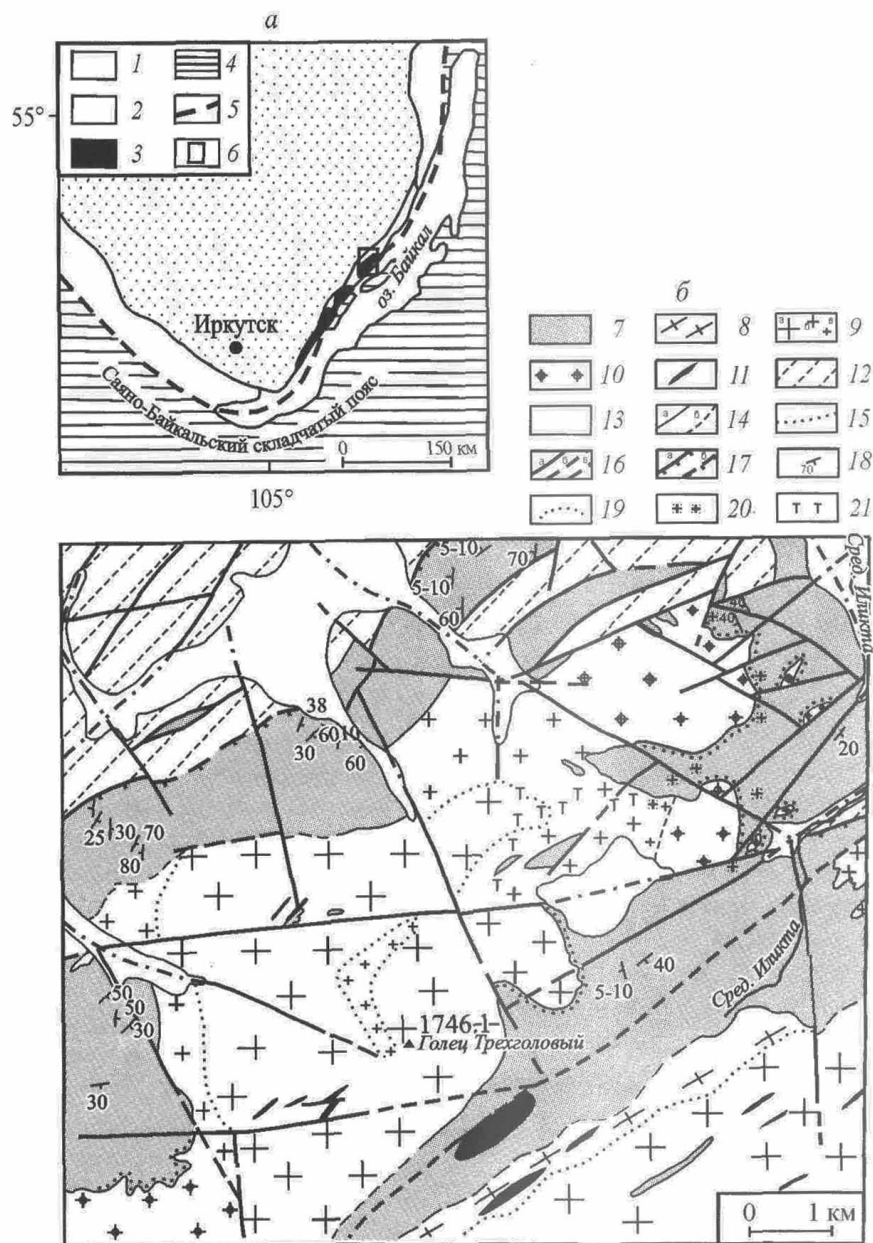


Рис. 1. Местоположение (а) и геологическое строение района (б) (по данным Государственной геологической съемки масштаба 1:50 000 с дополнениями авторов).

1 — неогейский плитный комплекс Сибирской платформы и областей активизации; 2 — краевые выступы фундамента Сибирской платформы (архей-протерозой); 3 — раннепротерозойский постколлизийный приморский комплекс; 4 — Саяно-Байкальский складчатый пояс; 5 — коллизийный шов; 6 — участок работ (массив Трехголовый); 7 — иликтинская свита сарминской серии PR₁; 8–10 — граниты приморского комплекса: 8, 9 — первой фазы [8 — гнейсовидные крупноовоидные, 9 — равномернозернистые и порфировидные крупнозернистые (а), среднезернистые и мелко-среднезернистые (б), мелкозернистые и гранит-порфиры (в)], 10 — второй фазы; 11 — диабазы; 12 — голоустенская свита R₃ (платформенный чехол); 13 — современные отложения; 14 — границы разновозрастных фациальных подразделений; 15 — границы разновозрастных фациальных подразделений; 16 — главные разрывные нарушения: а — установленные, б — предполагаемые, в — скрытые под более молодыми образованиями; 17 — надвиги: а — достоверные, б — предполагаемые; 18 — залегание пластов; 19 — ороговикование; 20 — грейзенизация, 21 — турмалинизация в гранитах.

Fig. 1. Scheme of location (а) and geological structure of the region (б) according to data of geological mapping in 1 : 50 000 scale (with some authors' additions).

(рис. 1, б), где встречается в метаморфических породах на контакте с гранитами, кварц-турмалиновых обособлениях в гранитах, а также в грейзенах и кварцевых жилах. Массив сложен крупноовоидными биотитовыми гранитами и равномернозернистыми и порфировидными лейкократовыми гранитами. Последние по величине зерен варьируют от крупнозернистых до мелкозернистых и гранит-порфиров. Граниты прорывают кварц-серицит-хлоритовые сланцы, филлиты, метапесчаники, которые на контакте с гранитами ороговикуются. Шлиры приурочены к краевой части массива и встречаются на площади около 1 км². Вмещающие граниты не несут следов интенсивных наложенных деформаций. Распределение шлиров по площади неравномерное и беспорядочное; они довольно редки, примерно один на несколько м².

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРАНИТОВ И ШЛИРОВ

Вмещающие шлиры граниты характеризуются гипидиоморфнозернистой и гранофировой структурами. Доминирующими минералами в них являются кварц (40—45 %) и калиевый полевой шпат, нередко микропертитовый (40—45 %), кислый плагиоклаз содержится в резко подчиненном количестве (10—15 %). На долю биотита приходится около 3 %, на отдельных участках он замещается мусковитом и хлоритом. В промежутках между зернами лейкократовых минералов отмечается флюорит.

Обособления (шлиры) кварц-турмалинового состава имеют отчетливые, слабо извилистые границы с гранитами и обычно окружены зоной осветленного, не содержащего биотита гранита шириной до 2 см. Величина шлиров варьирует, достигая 10—12 см в длину и 5—8 см в поперечнике. В мелкозернистых гранитах шлиры более мелкие, в средне-крупнозернистых гранитах более крупные и имеют большую величину зерен. В краевой части шлиров проявлено замещение турмалином полевых шпатов гранита с образованием в них червеобразных вrostков, что создает впечатление мелкозернистой струк-

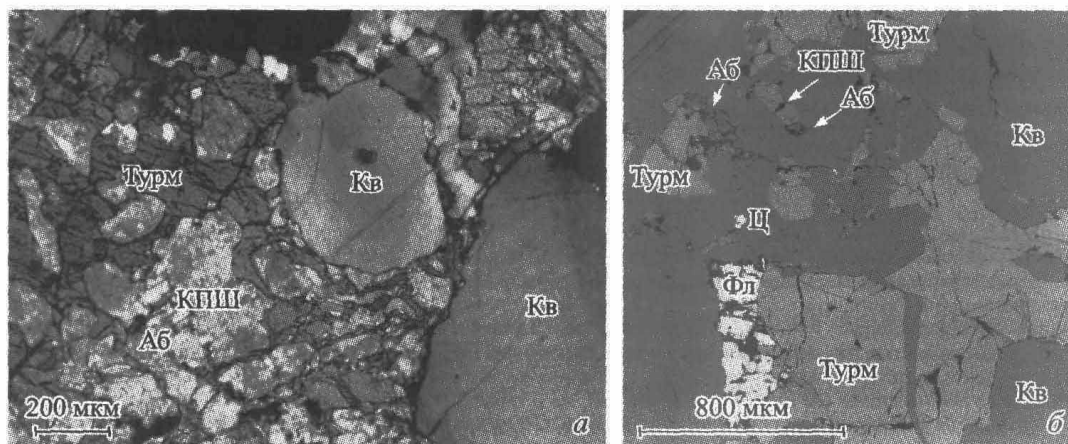


Рис. 2. Взаимоотношения породообразующих минералов в кварц-турмалиновых шлирах.
а — замещение турмалином калиевого полевого шпата в краевой части шлира; *б* — окварцевание в центральной части шлира. Сокращения здесь и на рис. 3: Аб — альбит, Б — бастнезит, Кв — кварц, КПШ — калиевый полевой шпат, Кс — ксенотим, М — монацит, Турм — турмалин, Фл — флюорит, Хл — хлорит, Ц — циркон.

Fig. 2. Relationship of rock-forming minerals in quartz-tourmaline schlieren.

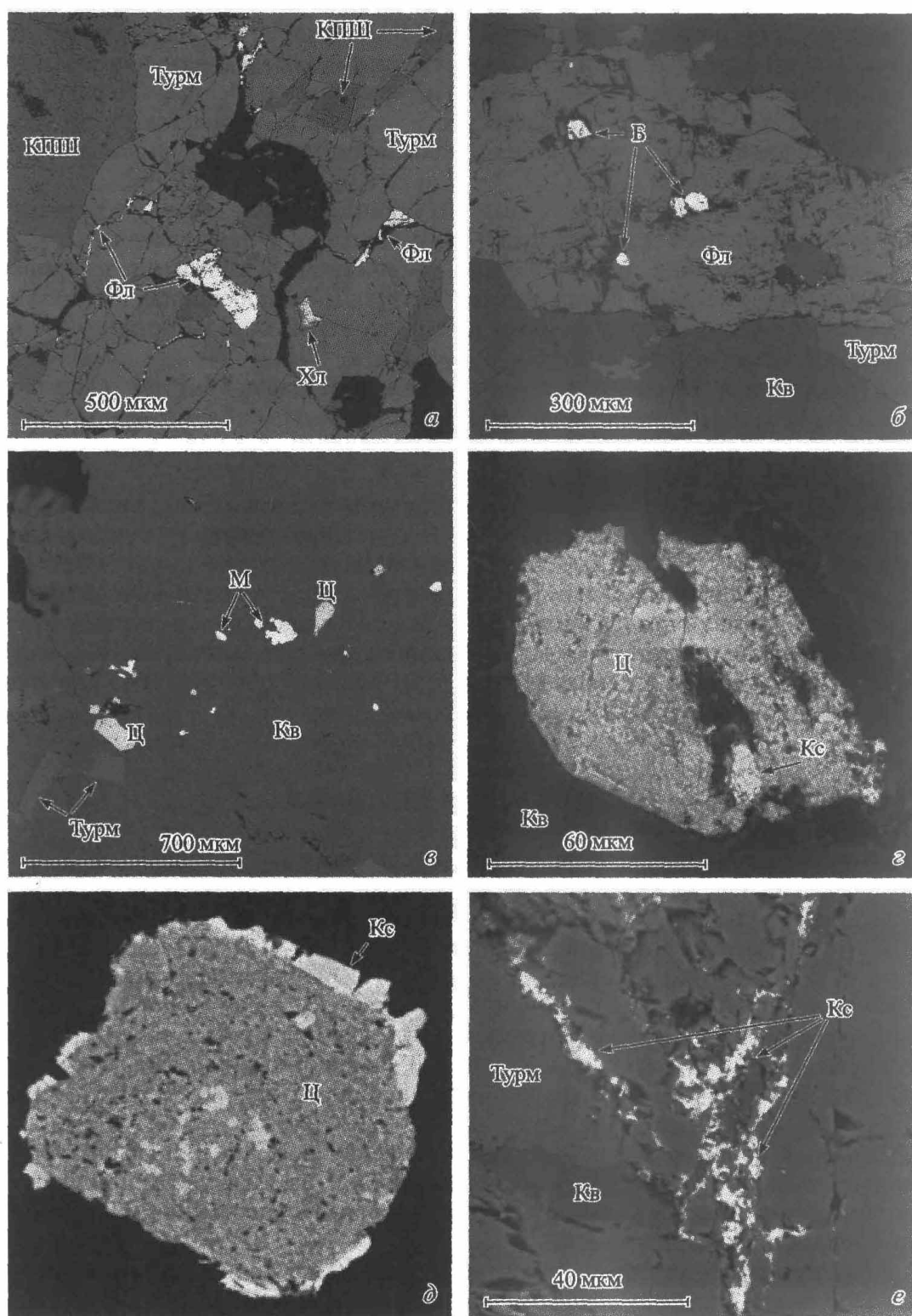


Рис. 3. Взаимоотношения акцессорных минералов в кварц-турмалиновых шлирах.
a — включения и прожилки флюорита в турмалине; *б* — включения бастнезита в флюорите; *в* — включения циркона и монацита в кварце; *г*, *д* — корродированные зерна циркона, замещаемые ксенотимом; *е* — прожилок ксенотима в турмалине.

Fig. 3. Relationship of accessory minerals in quartz-tourmaline schlieren.

туры (рис. 2, а), одновременно проявлена альбитизация калиевого полевого шпата. Центральная часть шлиров более крупнозернистая (величина зерен до 5—8 мм) и сложена кварцем (60—65 %) и турмалином (35—40 %) с реликтами полевых шпатов. В центральной части шлиров наблюдается окварцевание: прожилки кварца в турмалине и разрозненные реликты турмалина и полевых шпатов в кварце (рис. 2, б).

Турмалин в шлифах имеет преимущественно оливково-зеленую окраску, иногда сменяющуюся по краям зерен голубоватой; в ряде случаев центральные части зерен окрашены в рыжевато-коричневый, а краевые в зеленовато-голубой цвета. Биотит в шлирах отсутствует, но во включениях в турмалине отмечены редкие зерна хлорита и хлоритизированного биотита. Среди кварца встречаются отдельные зерна мусковита.

Нередко в центральной части шлиров отмечается флюорит. Он присутствует в виде ксеноморфных зерен среди кварца, развивается, подобно турмалину, по полевому шпату, образует включения в турмалине и выполняет в нем трещинки (рис. 3, а, б).

В шлирах обнаружены также акцессорные рутил, ильменит, циркон, монацит, ксенотим, бастнезит, молибденит, халькопирит. Зерна рутила замещаются ильменитом. Циркон имеет корродированную форму и иногда обрастается по краям ксенотимом (рис. 3, г). Он встречается как среди минералов замещаемого турмалином гранита, так и в виде включений в турмалине и кварце. Монацит присутствует во включениях в кварце (рис. 3, в). Бастнезит образует включения в флюорите (рис. 3, б). Ксенотим обнаружен в виде прожилков в турмалине и каемок вокруг циркона (рис. 3, д, е).

ПЕТРОХИМИЯ И ГЕОХИМИЯ

Породы, слагающие район гольца Трехголового, представлены лейкогранитами нормальной и несколько повышенной щелочности, с высокими содержаниями SiO_2 (77—78 мас. %), низкими содержаниями MgO (<0.15 мас. %) и CaO (<0.50 мас. %), высокими отношениями $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (в среднем 1.9), железистостью (92—95 %) и апгаитностью (0.93) и низкими глиноземистостью ($A/\text{CNK} = 1.00—1.01$) и окисленностью железа [$K_{\text{ок}} = \text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) = 0.12—0.15$]. В гранитах повышены относительно кларковых содержания F, Li, Rb, Cs, Sn, Pb, Th, U, Ga, As, Ni, Mo, Cu, PЗЭ, понижены — Ba, Sr, Zr, Zn, Be, Sc, V, наблюдаются низкие отношения K/Rb (80—90) и Ba/Rb (0.09—0.28) (табл. 1, группы 1 и 2).

Граниты, пробы которых отобраны в поле распространения кварц-турмалиновых шлиров (группа 3), отличаются от гранитов за пределами поля распространения шлиров (группы 1, 2) более высокими содержаниями SiO_2 и пониженными содержаниями REE.

Граниты с небольшими кварц-турмалиновыми обособлениями (группы 4, 5) отличаются повышенными содержаниями Fe_2O_3 , Ni, Sc и значениями A/CNK и $K_{\text{ок}}$, пониженными содержаниями CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , редких щелочей, Pb, Y, Nb.

Кварц-турмалиновые шлиры (группы 6, 7) по сравнению с гранитами имеют более низкие содержания кремнезема, кальция, натрия, калия, фосфора, высокие содержания окисного железа и бора, повышенные — закисного железа, фтора, магния. В шлирах возрастают окисленность железа (до 0.7) и гли-

Химический состав гранитов и кварц-турмалиновых шлиров

Chemical composition of granites and quartz-tourmaline schlieren

Компонент	1 (5)	2 (7)	3 (5)	4 (3)	5 (2)	6 (1)	7 (3)
SiO ₂	77.18	78.04	78.94	77.14	78.49	75.37	75.95
TiO ₂	0.15	0.11	0.13	0.14	0.12	0.12	0.13
Al ₂ O ₃	11.15	10.81	10.38	11.24	10.38	11.51	10.91
Fe ₂ O ₃	0.29	0.19	0.18	1.41	2.49	4.77	5.38
FeO	1.68	1.47	1.78	1.21	1.67	2.03	2.04
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
MgO	0.10	0.14	0.10	0.14	0.16	0.13	0.23
CaO	0.39	0.42	0.34	0.22	0.22	0.10	0.25
Na ₂ O	2.77	2.74	2.38	2.26	1.81	1.93	0.79
K ₂ O	5.35	5.11	5.06	4.74	3.33	0.78	0.88
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
H ₂ O ⁻	0.10	0.08	0.11	0.07	0.06	0.09	0.05
П.п.п.	0.57	0.53	0.62	0.39	0.36	0.36	0.38
B ₂ O ₃	—	—	—	0.64	1.21	2.29	2.63
F	0.18	0.25	0.14	0.21	0.19	0.30	0.47
-O ₂ (F)	0.08	0.10	0.06	0.09	0.08	0.13	0.20
Сумма	99.87	99.87	100.14	99.75	100.44	99.67	99.92
A/CNK	1.01	1.00	1.04	1.22	1.49	2.74	4.52
K _{ар}	0.93	0.93	0.90	0.79	0.63	0.35	0.20
K ₂ O/Na ₂ O	1.9	1.9	2.1	2.1	1.8	0.4	1.1
f	95	92	95	95	96	98	97
K _{ок}	0.15	0.12	0.09	0.53	0.60	0.70	0.73
Li	50	41	63	20	13	16	20
Rb	496	533	510	390	275	68	88
Cs	11	11	15	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
Sr	17	8.6	9.5	9	7.8	3.2	5.9
Ba	140	46	88	92	67	12	17
Y	37	48	37	31	26	31	30
REE	524	404	203	—	—	163	150
Zr	154	124	154	160	130	160	120
Nb	20	22	20	17	13	4.3	7
Ga	26	25	27	27	31	51	49
As	19	9	12	107	6.5	Не обн.	31
Sn	11	10	16	5	9	23	24
Pb	38	28	33	19	15	7	15
Zn	20	15	25	28	46	83	95
Be	1.2	1.3	0.9	2.8	2.1	24	3.7
Co	2.0	2.2	2.3	2.5	3.2	6.9	5.7
Ni	9.3	8.8	10	9.5	17	17	15
Sc	2.9	3.4	3.3	4.6	6	7.1	12
V	4.4	3.9	2.8	4.7	4.2	6.6	4
Cu	14	14	17	15	24	40	29
Mo	4.4	4.0	5.0	—	—	5.4	18.3

Таблица 1 (продолжение)

Компонент	1 (5)	2 (7)	3 (5)	4 (3)	5 (2)	6 (1)	7 (3)
Ge	1.6	1.7	1.4	—	—	15.4	1.4
Hf	4.9	10.2	7.8	—	—	8.0	6.2
Ta	2.1	4.2	2.6	—	—	1.5	1.9
Th	85.8	83.1	57.2	—	—	48.1	55.0
U	11.2	15.6	11.8	—	—	6.6	4.5

Примечание. Содержания петрогенных компонентов выражены в мас. %, редких элементов — г/т. Здесь и в табл. 2: 1 — мелкозернистые биотитовые граниты и гранит-порфиры краевой и апикальной зон массива; 2 — равномерно-крупнозернистые биотитовые граниты за пределами поля распространения кварц-турмалиновых шлиров; 3 — те же граниты в пределах поля распространения шлиров; 4, 5 — граниты с небольшими обособлениями кварц-турмалинового состава (4 — мелкозернистые, 5 — средне-крупнозернистые); 6, 7 — кварц-турмалиновые шлиры (6 — в мелкозернистом граните, 7 — в средне-крупнозернистых гранитах). В скобках — число проб, по которым рассчитано среднее. $A/CNK = Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$, $K_{ag} = (Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$, $f = 100(Fe_2O_3+FeO)/(Fe_2O_3+FeO+MgO)$, $K_{ок} = Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$. Анализы выполнены в ИЗК СО РАН: содержания петрогенных компонентов, F и B_2O_3 определялись методом «мокрой» химии; Li и Cs — методом фотометрии пламени, REE, Mo, Ge, Hf, Ta, Th, U — ICP-MS, остальных элементов — рентгенофлуоресцентным методом. Прочерк — данные отсутствуют.

ноземистость A/CNK (до 4.5) и снижаются отношение K_2O/Na_2O (до 0.4) и алкалитность (до 0.20). По сравнению с гранитами шлиры обеднены редкими щелочами, Ba, Pb, Nb, Ta, U, Y, REE. В то же время в них выше содержания Be (в 3—20 раз), Zn (в среднем в 5 раз), Sc и Co (в среднем в 3 раза), Cu (в 2.5 раза), Ga, Sn, Ni (в 1.8—2.4 раза), а также As и Mo.

Данные газового хроматографического анализа (табл. 2) показывают, что главной составляющей флюида гранитов является вода, на долю которой приходится 88—93 об. %. Шлиры по сравнению с гранитами в среднем в два раза обогащены всеми флюидными компонентами, при этом доля газов группы углерода во флюиде (X_{CO_2}) практически не меняется, но проявлена тенденция к росту восстановленности флюида за счет существенного увеличения в шлирах содержания водорода.

Таблица 2

Содержания флюидных компонентов (мг/л) в гранитах и шлирах

Contents of fluid components (mg/l) in granites and schlieren

Компонент	1 (5)	2 (7)	3 (4)	4 (3)	5 (2)	6 (1)	7 (3)
H ₂ O	5.38	5.24	6.08	5.23	7.25	10.4	11.07
CO ₂	0.35	0.21	0.22	0.31	0.16	0.56	0.32
CO	0.16	0.09	0.08	0.14	0.13	0.43	0.33
H ₂	0.20	0.11	0.14	0.18	0.44	0.50	0.83
X_{CO_2}	0.08	0.05	0.05	0.08	0.04	0.08	0.05
$K_{вос}$	0.06	0.04	0.03	0.05	0.07	0.08	0.09

Примечание. $X_{CO_2} = (CO_2+CO)/(H_2O+CO_2+CO+H_2)$, $K_{вос} = 100(CO+H_2)/(H_2O+CO_2+CO+H_2)$ — коэффициент восстановленности флюида. Анализы выполнены в ИЗК СО РАН на лабораторном хроматографе ЛХМ-8МД; температура нагрева 850 °С.

СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Состав *калиевого полевого шпата* в гранитах и кварц-турмалиновых шлирах отвечает теоретической формуле, *плагноклаз* содержит незначительную примесь анортитового компонента ($< 2\%$). *Биотиты* из гранитов, вмещающих шлиры, и гранитов за пределами поля распространения шлиров практически не отличаются по составу. Они представлены аннитом с низким содержанием TiO_2 (1.0—1.6 мас. %) и повышенным содержанием F (до 1.5 мас. %). Глиноземистость $l = 100\text{Al}/(\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg})$ варьирует в узких пределах: от 21.1 до 24.5, железистость $f = \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ равна 0.82—0.95.

Турмалин по результатам 62 точечных анализов имеет довольно однообразный состав. Он представлен железистой разновидностью: отношение $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$, за редким исключением, равно 0.95—1.0. Содержание MgO в основном менее 0.85 мас. %, CaO — менее 0.1 мас. %, в то же время в половине анализов присутствует TiO_2 , а в единичных анализах установлен F (табл. 3). Под электронным микроскопом в зернах наблюдается пятнистая зональность, предположительно отражающая рост зерен турмалина из множества центров кристаллизации (рис. 2, а). В общем случае темные участки в центральных частях зерен характеризуются пониженными содержаниями Na_2O , FeO , TiO_2 и повышенными Al_2O_3 по сравнению со светлыми зонами по периферии зерен (рис. 4, а; табл. 4). Реже в железистом турмалине обнаруживаются участки с повышенными содержаниями MgO (до 3 мас. %), TiO_2 и пониженным — FeO (рис. 4, б; табл. 4). Турмалины из шлиров в мелкозернистых гранитах и средне-крупнозернистых гранитах по химическому составу не отличаются. На тройной диаграмме $\text{Al}-\text{Fe}-\text{Mg}$ (Henry, Guidotti, 1985) все точки составов турмалина из шлиров располагаются в поле турмалинов из бедных Li гранитов, пегматитов и аплитов (рис. 5). Поскольку на этой диаграмме составы турмалина из шлиров группируются вокруг фигуративной точки, отвечающей как шерлу $\text{NaFe}_3^{2+}\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$, так и бюргериту $\text{NaFe}_3^{3+}\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{O}_3\text{F}$ для уточнения видовой принадлежности минерала в Химической лаборатории ИЗК СО РАН были определены содержания Fe_2O_3 и FeO в монофракциях турмалина, предварительно истертых в агатовой ступке. В трех монофракциях отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ составляет 0.85—0.87 (табл. 3), т. е. турмалин, по-видимому, является бюргеритом, на что указывает и высокая окисленность железа в валовых пробах шлиров (табл. 1).

Химический состав *флюорита*, присутствующего в шлирах в ассоциации с турмалином, отвечает теоретической формуле.

Рутил, замещаемый в шлирах ильменитом, содержит примеси Nb_2O_5 (5.4 мас. %) и SnO_2 (0.75 мас. %). В *ильмените* установлены примеси MnO (0.84 мас. %), V_2O_3 (0.68 мас. %) и Nb_2O_5 (1.14 мас. %).

Неизмененные зерна *циркона* из включений в кварце и турмалине содержат 1.56—1.95 мас. % HfO_2 и имеют отношение $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$, равное 32—39 (табл. 5, ан. 1, 2). В анализах корродированных зерен циркона, иногда замещаемых ксенотимом, содержание HfO_2 ниже предела обнаружения. Суммы оксидов и содержания ZrO_2 и SiO_2 в них понижены, но в то же время в анализах появляются оксиды Y, Th, U, Al, Fe, Ca, иногда K в сумме до 16 мас. %, F до 6.8 мас. % и P_2O_5 до 5.6 мас. % (ан. 3—6).

Монацит из включений в кварце имеет селективно цериевый состав редких земель в пересчете на 100 % следующий: $\text{Ce}_{57.6}\text{La}_{24.4}\text{Nd}_{13.2}\text{Pr}_{4.8}$ (табл. 6, ан. 1). *Бастнезит* содержит примеси ThO_2 в количестве до 5.6 мас. %.

Таблица 3

Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах турмалина

Composition of tourmaline and crystal-chemical coefficients in its formulas

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	118/8_4 (n = 8)	80/08_1 (n = 9)	80/08_2 (n = 3)	74/08_1 (n = 6)	74/08_3 (n = 4)	82/08_5 (n = 2)	82/08_6 (n = 1)	82_1/08_1 (n = 3)	82_1/08_2 (n = 2)
SiO ₂	34.25	34.25	34.06	33.95	33.33	34.47	32.86	33.74	34.17
TiO ₂	0.14	0.05	0.52	0.41	0.19	0.18	0.47	0.15	0.34
Al ₂ O ₃	30.86	30.01	29.36	30.67	30.92	31.16	29.15	30.54	30.19
FeO	18.62	19.09	19.38	17.74	18.13	17.59	18.51	18.72	19.45
MnO	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
MgO	0.17	0.30	» »	0.84	0.08	0.30	» »	» »	0.20
CaO	Не обн.	Не обн.	» »	0.07	0.05	Не обн.	» »	» »	Не обн.
Na ₂ O	2.27	2.54	2.82	2.56	2.46	2.10	2.60	2.38	2.42
F	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	1.18	Не обн.	Не обн.
-O ₂ (F)	—	—	—	—	—	—	0.50	—	—
Сумма	86.31	86.24	86.14	86.24	85.16	85.80	84.27	85.53	86.77
Si	5.939	5.973	5.972	5.888	5.862	5.970	5.922	5.920	5.933
Al(T)	0.061	0.027	0.028	0.112	0.138	0.030	0.078	0.080	0.067
Al(Z)	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al(Y)	0.243	0.140	0.038	0.152	0.270	0.326	0.112	0.234	0.111
Ti	0.019	0.007	0.069	0.053	0.024	0.023	0.064	0.020	0.043
Fe	2.702	2.784	2.840	2.573	2.666	2.549	2.789	2.745	2.823
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.045	0.077	0.000	0.214	0.021	0.079	0.000	0.000	0.051
Y ^T	3.009	3.008	2.947	2.992	2.981	2.977	2.965	2.999	3.028
Ca	0.000	0.000	0.000	0.013	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.765	0.857	0.959	0.861	0.837	0.705	0.908	0.808	0.814
X ^T	0.765	0.857	0.959	0.874	0.846	0.705	0.908	0.808	0.814
F	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.972	0.000	0.000
Na/(Ca+Na+K)	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Fe/(Fe+Mg)	0.98	0.97	1.00	0.93	0.99	0.97	1.00	1.00	0.98
Fe ₂ O ₃ /(Fe ₂ O ₃ +FeO)	0.87	0.85		0.86			Не опр.		

Примечание. 1—9 — средние составы турмалина из разных участков шлиров: 1—5 — шлиры в средне-крупнозернистых гранитах; 6—9 — в мелкозернистом граните (6, 7 — краевая часть шлира, контакт с гранитом, 8, 9 — центральная часть шлира). n — количество точек, по которым рассчитано среднее. Анализы здесь и в табл. 4—7 выполнены в ГИН СО РАН на электронном сканирующем микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss International) с энергодисперсионным анализатором INCAEnergy 350 (Oxford Instruments Analytical Ltd.). Отношение Fe₂O₃/(Fe₂O₃+FeO) рассчитано по результатам химического определения содержания окисного и закисного железа в монофракциях турмалина.

Y₂O₃ — до 2.7 мас. % и CaO — до 1.7 мас. %. В составе лантаноидов преобладает Ce; но в отличие от монацита бастнезита наряду с легкими РЗЭ содержит также Sm и Gd (табл. 7). Усредненный состав РЗЭ в пересчете на 100 %: Ce_{51.8}La_{23.2}Nd_{16.6}Pr_{3.5}Sm_{3.5}Gd_{1.4}.

Ксенотим из разных зерен несколько отличается по составу редких земель: в одном случае преобладает Yb, в пересчете на 100 % состав ланта-

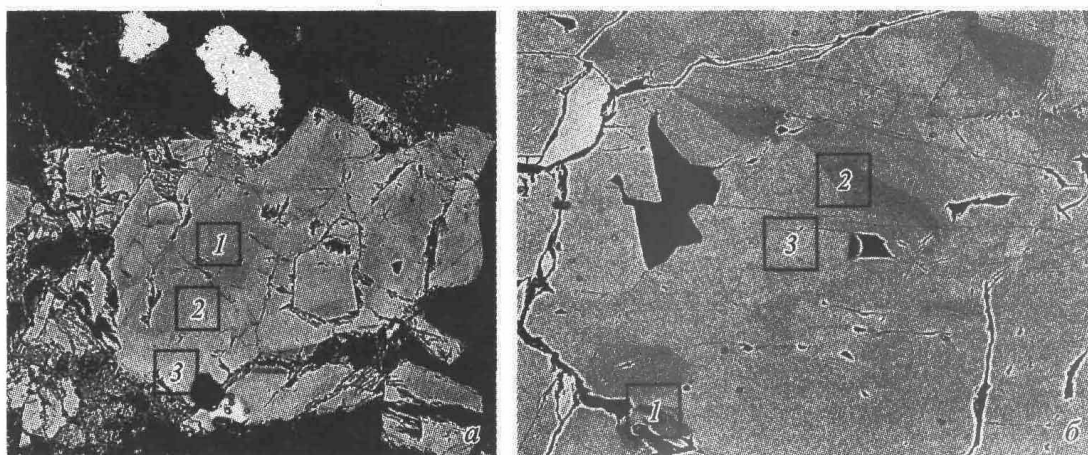


Рис. 4. Зональность в зернах турмалина.

Номера точек отвечают номерам в табл. 4, а — обр. 118/08_1_1, б — обр. 74/08_1_2.

Fig. 4. Zoning in tourmaline grains.

Таблица 4

Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах зональных зерен турмалина

Composition and coefficients in crystal-chemical formulas of zonal tourmaline grains

Компонент, мас. %	118/08_1_1			118/08_2_2			74/08_1_2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SiO ₂	35.51	34.23	34.51	34.70	34.91	34.79	35.00	33.93	33.25
TiO ₂	0.30	0.38	0.78	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.45	0.52	Не обн.
Al ₂ O ₃	33.05	31.27	30.48	33.25	32.08	31.65	30.14	30.95	30.35
FeO	16.18	17.87	18.67	16.07	17.39	18.67	15.76	17.34	19.09
MnO	Не обн.	0.27	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
MgO	» »	Не обн.	» »	» »	» »	» »	2.72	0.43	» »
CaO	» »	» »	» »	» »	» »	» »	Не обн.	Не обн.	0.20
Na ₂ O	1.73	2.47	2.51	1.83	1.98	2.49	2.67	2.36	2.56
Сумма	86.77	86.49	86.95	85.85	86.36	87.60	86.74	85.53	85.45
Si	5.996	5.912	5.950	5.929	5.982	5.938	5.965	5.905	5.896
Al(T)	0.004	0.088	0.050	0.071	0.018	0.062	0.035	0.095	0.131
Al(Z)	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al(Y)	0.572	0.276	0.142	0.624	0.459	0.303	0.017	0.252	0.182
Ti	0.038	0.049	0.101	0.000	0.000	0.000	0.058	0.068	0.000
Fe	2.284	2.580	2.691	2.296	2.491	2.664	2.245	2.523	2.817
Mn	0.000	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.690	0.111	0.000
Y ^T	2.894	2.944	2.934	2.920	2.950	2.967	3.010	2.954	2.999
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038
Na	0.566	0.827	0.838	0.606	0.657	0.823	0.882	0.796	0.876
X ^T	0.566	0.827	0.838	0.606	0.657	0.823	0.882	0.796	0.914
Fe/(Fe+Mg)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.76	0.96	1.00

Примечание. Номера анализов в зернах 118/08_1_1 и 74/08_1_2 соответствуют точкам на рис. 6. В зерне 118/08_2_2: 1 — темный участок в центре, 2 — промежуточная зона, 3 — светлая краевая часть зерна.

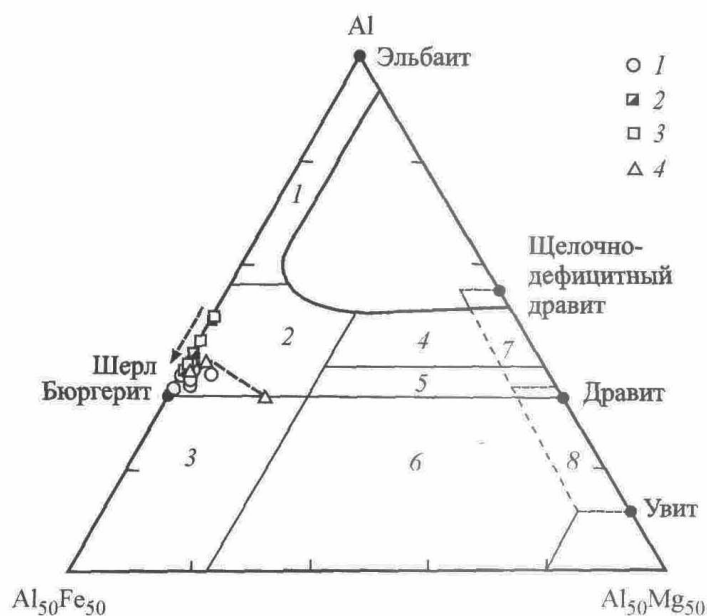


Рис. 5. Составы турмалина из кварц-турмалиновых шлиров на диаграмме Al-Fe-Mg (Henry, Guidotti, 1985).

1 — средние составы турмалина из разных участков шлиров (табл. 4); 2—4 — зональные зерна (табл. 5): 2 — обр. 118/08_1_1, 3 — обр. 118/08_2_2, 4 — обр. 74/08_1_2. Стрелками показано изменение состава в зональных зернах. Поля на диаграмме показывают состав турмалина из разных типов пород: 1 — богатых Li гранитоидов и ассоциирующихся с ними пегматитов и аплитов; 2 — бедных Li гранитоидов, пегматитов и аплитов; 3 — богатых Fe^{3+} кварц-турмалиновых пород (гидротермально измененных гранитов); 4 — метапелитов и метапсаммитов, сосуществующих с насыщенными Al фазами; 5 — метапелитов и метапсаммитов, не сосуществующих с насыщенными Al фазами; 6 — богатых Fe^{3+} кварц-турмалиновых пород, известково-силикатных пород и метапелитов; 7 — низкокальциевых метаультрамафитов и богатых Cr, V метаседиментов; 8 — метакarbonатов и метапироксенитов.

Fig. 5. Compositions of tourmalines from quartz-tourmaline schlieren on the ternary Al-Fe-Mg diagram (Henry, Guidotti, 1985).

Таблица 5

Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах циркона (1, 2) и продуктов его изменения (3—6) в кварц-турмалиновых шлирах

Composition and coefficients in crystal-chemical formulas of zircon (1, 2) and products of its alteration (3—6) in quartz-tourmaline schlieren

Компонент, мас. %	1	2	3	4	3	6
	80/08_2_1	80/08_2_2	82_1/08_2_1	82_1/08_2_2	118/08_3	82_1/08_1_3
K ₂ O	Не обн.	Не обн.	0.69	0.48	Не обн.	Не обн.
CaO	» »	» »	0.83	0.80	0.41	0.53
FeO	» »	» »	2.69	3.56	1.44	1.55
Al ₂ O ₃	» »	» »	1.21	1.44	2.23	0.93
Y ₂ O ₃	» »	» »	5.44	5.24	6.12	4.36
SiO ₂	31.68	31.11	15.45	16.56	21.16	16.19
ZrO ₂	62.88	61.54	45.68	44.40	46.25	44.47
HfO ₂	1.95	1.56	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
ThO ₂	Не обн.	Не обн.	2.53	2.51	4.92	2.53
UO ₂	» »	» »	1.62	1.69	1.12	1.55
P ₂ O ₅	» »	» »	Не обн.	5.59	Не обн.	Не обн.

Таблица 5 (продолжение)

Компонент, мас. %	1	2	3	4	3	6
	80/08_2_1	80/08_2_2	82_1/08_2_1	82_1/08_2_2	118/08_3	82_1/08_1_3
F	Не обн.	Не обн.	6.85	6.02	4.03	2.16
-O ₂ (F)	—	—	2.88	2.53	1.70	0.91
Сумма	96.51	94.21	80.11	85.76	85.98	73.36
Коэффициенты (O = 4)						
K	0.000	0.000	0.040	0.024	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.041	0.034	0.017	0.027
Fe	0.000	0.000	0.103	0.118	0.048	0.061
Al	0.000	0.000	0.065	0.067	0.104	0.052
Y	0.000	0.000	0.132	0.110	0.129	0.110
Si	1.008	1.011	0.707	0.656	0.841	0.766
Zr	0.975	0.975	1.019	0.857	0.896	1.024
Hf	0.018	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000
Th	0.000	0.000	0.026	0.023	0.045	0.028
U	0.000	0.000	0.017	0.015	0.010	0.017
P	0.000	0.000	0.000	0.187	0.000	0.000
F	0.000	0.000	0.991	0.754	0.506	0.317

Примечание. 1—4 — зерна циркона среди кварца; 5 — циркон в прожилке ксенотима, секущего турмалин, 6 — реликты циркона, замещаемого ксенотимом.

Таблица 6

Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах фосфатов РЗЭ

Composition and coefficients in crystal-chemical formulas of REE phosphates

Компонент, мас. %	1	2	3	Коэффици- циент	1	2	3
	80/08_2_2	118/08_4_1_1	82_1/08_1_3		80/08_2_2	118/08_4_1_1	82_1/08_1_3
FeO	Не обн.	0.59	Не обн.	Fe	0.000	0.016	0.000
La ₂ O ₃	16.51	Не обн.	» »	La	0.241	0.000	0.000
Ce ₂ O ₃	39.28	» »	» »	Ce	0.568	0.000	0.000
Pr ₂ O ₃	3.31	» »	» »	Pr	0.048	0.000	0.000
Nd ₂ O ₃	9.19	» »	» »	Nd	0.130	0.000	0.000
Gd ₂ O ₃	Не обн.	1.27	» »	Gd	0.000	0.013	0.000
Dy ₂ O ₃	» »	4.54	4.65	Dy	0.000	0.046	0.049
Ho ₂ O ₃	» »	Не обн.	1.89	Ho	0.000	0.000	0.020
Er ₂ O ₃	» »	3.52	5.03	Er	0.000	0.035	0.051
Yb ₂ O ₃	» »	3.78	7.25	Yb	0.000	0.037	0.072
Y ₂ O ₃	» »	48.12	43.51	Y	0.000	0.813	0.751
ThO ₂	1.99	Не обн.	Не обн.	Th	0.018	0.000	0.000
P ₂ O ₅	29.72	38.18	37.67	P	0.994	1.027	1.035
Сумма*	100	100	100				

Примечание. 1 — монацит (включения в кварце); 2, 3 — ксенотим; 2 — кайма вокруг зерна циркона, 3 — замещающий циркон. Коэффициенты рассчитаны на O = 4; * — нормирование на 100 %.

**Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах
фторкарбонатов РЗЭ**

**Composition and coefficients in crystal-chemical formulas of REE
fluorinecarbonates**

Компонент, мас. %	1	2	Коэффи- циент	1	2
	80/08_2_1	80/08_3		80/08_2_1	80/08_3
CaO	1.68	0.50	Ca	0.083	0.024
La ₂ O ₃	11.49	13.18	La	0.196	0.216
Ce ₂ O ₃	27.14	28.11	Ce	0.459	0.457
Pr ₂ O ₃	2.20	1.52	Pr	0.037	0.025
Nd ₂ O ₃	8.24	9.97	Nd	0.136	0.158
Sm ₂ O ₃	1.82	2.11	Sm	0.029	0.032
Gd ₂ O ₃	He обн.	1.73	Gd	0.000	0.025
Y ₂ O ₃	» »	2.65	Y	0.000	0.063
ThO ₃	5.64	He обн.	Th	0.059	0.000
F	8.62	7.90	F	1.260	1.110
-O ₂ (F)	3.63	3.33			
Сумма	63.20	64.34			

Примечание. Коэффициенты рассчитаны на 1 катион.

ноидов следующий: Yb_{37.6}Er_{26.7}Dy_{25.5}Ho_{10.2}, в другом случае в минерале повышена доля Dy, в пересчете на 100 %: Dy_{35.3}Yb_{27.8}Er_{26.7}Gd_{10.2} (табл. 6, ан. 2, 3).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Эллипсоидальные обособления кварц-турмалинового состава, которые носят в литературе разные названия — шпирь, пятна, нодулы, гнезда или орбикулы, достаточно широко распространены. Они известны в лейкогранитах батолита Сигул в Канаде (Sinclair, Richardson, 1992), в гранитах Чехии (Buriánec, Novák, 2004) и Южной Африки (Rozendaal, Bruwer, 1995; Trumbull et al., 2008); в обзоре А. Розендаля и Л. Брувера (Rozendaal, Bruwer, 1995) содержатся упоминания о подобных нодулах в гранитах и аплитах Англии, Германии, Италии, Тасмании и Малайзии. Эти обособления рассматриваются как результат гидротермального изменения гранитов (Rozendaal, Bruwer, 1995); отделения от расплава и последующего обособления равновесных с расплавом водных, богатых бором флюидов (Sinclair, Richardson, 1992); результат ликвации в расплавах, обогащенных летучими (Trumbull et al., 2008); выплавления гранитов под воздействием глубинной бороносной системы (Левин, Летникова, 2010).

В приморском комплексе шпирь обнаружены в гранитах, слагающих относительно малоглубинный массив. Особенности химического состава и геохимии гранитов показывают, что исходным для них являлся глубокодифференцированный расплав, обогащенный F, редкими щелочами, Sn и обедненный Ca, Mg и др. Шпирь приурочены главным образом к апикальной части

массива, где они располагаются среди массивных гранитов, с которыми имеют отчетливые границы. В свою очередь строение шлиров показывает, что образование турмалина в них обусловлено реакцией богатого бором флюида, содержащего Fe и Na, с полевыми шпатами гранита.

Форма шлиров, их беспорядочное распределение, отсутствие приуроченности к зонам катаклаза и следов подводящих каналов для растворов не позволяют связывать образование шлиров с наложенным на граниты гидротермальным процессом. На это же указывают соответствие состава турмалина из шлиров составу турмалина из бедных Li гранитов (Henry, Guidotti, 1985), обогащенность шлиров теми же элементами, которые накапливаются в лейкогранитах (F, Sn, Cu, Ni, Mo, Ga, As), близкий состав флюидных компонентов в гранитах и шлирах (табл. 2). Все это позволяет предполагать, что источником борсодержащего флюида являлся непосредственно лейкогранитный расплав. При этом обращает на себя внимание концентрирование в шлирах наряду с B, F, H₂O, Na железа и ряда рудных элементов (Zn, Sc, Co, Cu, Sn и некоторых других), что характерно для флюидных расплавов, отделяющихся от остаточной магмы на поздних стадиях дифференциации (Маракушев и др., 1983). В пользу реальности образования шлиров из флюидного расплава служат результаты экспериментов по синтезу гранитных пегматитов с добавлением B, F, P и результаты изучения расплавных включений в борсодержащих системах (Veksler, Thomas, 2002; Thomas et al., 2003; Перетяжко и др., 2010).

Представляется, что, вне зависимости от источников бора в расплаве, главными факторами, обусловившими образование шлиров в гранитах Трехголового массива, являются глубокая дифференциация исходной магмы, кристаллизация лейкогранитного расплава в малоглубинных условиях, способствовавшая накоплению летучих в апикальной части интрузии, низкая глиноземистость расплава, препятствовавшая кристаллизации турмалина. При достижении определенных концентраций летучих в алюмосиликатном расплаве могло произойти обособление капель расплава, богатого B, F, H₂O, Na, но бедного Al (раствора-расплава) и их последующая коагуляция (Trumbull et al., 2008). Наличие зоны осветления вокруг шлиров указывает на преимущественное перераспределение Fe и Mg из алюмосиликатного расплава в равновесный с ним флюидный расплав. Последний концентрировал также халькофильные и сидерофильные элементы (Zn, Cu, Ga, Sn, As, Co, Ni, Mo), но обладал низкой способностью к концентрированию литофильных элементов, за исключением Be и Sc (табл. 1).

Рост концентраций F и B в алюмосиликатном расплаве неизбежно влиял и на ход его кристаллизации. Это влияние выражается в расширении поля кристаллизации кварца, что, возможно, объясняет аномально высокое (79 мас. %) содержание SiO₂ в гранитах, вмещающих шлиры (табл. 1). Кроме того, повышенная кислотность расплава препятствовала кристаллизации монацита, чем может быть вызвано снижение концентраций РЗЭ в этих гранитах.

Поскольку флюидный расплав имел пониженную температуру солидуса, после кристаллизации алюмосиликатного расплава он оставался в жидком состоянии и при снижении температуры мог реагировать с богатыми глиноземом полевыми шпатами с образованием турмалина и альбита; турмалин при этом являлся главным концентратором Zn, Ga, Cu, Co, Ni, Sc. На ранней стадии кристаллизовался турмалин, обогащенный глиноземом и обедненный Na (на долю вакансий в позиции X приходится до 40 %); более поздние генера-

ции турмалина обогащены Na и Fe. Реже проявленное увеличение железистости в процессе роста зерен турмалина отражает, по-видимому, рост кислотности среды минералообразования. Учитывая взаимоотношения минералов в шлирах, можно полагать, что одновременно с образованием турмалина происходило отделение фтор-углекислого флюида, который экстрагировал HREE и Th. Взаимодействие этого флюида с Ca, высвобождающимся при замещении плагиоклаза турмалином и альбитом, привело к кристаллизации флюорита и бастнезита. Следующая стадия минералообразования представлена кристаллизацией кварца, в парагенезисе с которым отмечаются мусковит и монацит, а завершается процесс гидротермальным изменением зерен циркона с повышенными содержаниями Y, F, P и образованием ксенотима. Это позволяет предполагать, что на завершающей стадии эволюции минералообразующий флюид представлял собой водно-силикатную жидкость, при кристаллизации которой происходило отложение кварца и выделение водного раствора, содержащего анионы F^- и PO_4^{3-} , под воздействием которого происходили мусковитизация реликтов полевых шпатов и коррозия зерен циркона. Образование ксенотима на заключительной стадии, при нейтрализации кислого раствора, служит показателем резко выраженного фракционирования легких и тяжелых лантаноидов и иттрия во флюидном расплаве. В целом полученные данные указывают на активную роль бора в кристаллизации не только плюмазитовых гранитов, образовавшихся при плавлении метапелитов, но и умеренно глиноземистых рапакививидных гранитов, источником для которых являлись высокометаморфизованные архейские гнейсы (Донская и др., 2005).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 10-05-00289-а.

Список литературы

- Баданина Е. В., Томас Р., Сырицо Л. Ф., Векслер И. В., Трамболл Л. В. Высокая концентрация бора в расплаве, формирующем литий-фтористые граниты // Докл. РАН. 2003. Т. 390. № 1. С. 96—99.
- Бибиков Е. В., Кориковский С. П., Сезько А. И., Федоровский В. С. Возраст гранитов приморского комплекса (Западное Прибайкалье) по данным U-Pb-метода // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257. № 2. С. 462—466.
- Брынцев В. В., Петрова З. И., Левицкий В. И. Рапакививидные граниты южного обрамления Сибирской платформы // Известия АН СССР. Сер. геол. 1984. № 1. С. 11—22.
- Великославинский Д. А., Биркис А. П., Богатиков О. Ф. и др. Анортозит-рапакививитная формация Восточно-Европейской платформы. Л.: Наука, 1978. 296 с.
- Граменицкий Е. Н., Щекина Т. И., Ключарева С. М. Редкометальные литий-фтористые граниты Уксинского массива и их место в формировании Салминского плутона // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1998. № 1. С. 41—49.
- Донская Т. В., Гладкоуб Д. П., Ковач В. П., Мазукабзов А. М. Петрогенезис раннепротерозойских постколлизийных гранитоидов юга Сибирского кратона // Петрология. 2005. Т. 13. № 3. С. 253—279.
- Левин А. В., Летникова А. Ф. Турмалиновые граниты графит-алмазного месторождения Кумды-Коль // Докл. РАН. 2010. Т. 435. № 5. С. 1—4.
- Маракушев А. А., Граменицкий Е. Н., Коротаев М. Ю. Петрологическая модель эндогенного рудообразования // Геол. рудн. месторожд. 1983. № 1. С. 3—20.
- Перетяжко И. С., Прокофьев В. Ю., Загорский В. Е., Смирнов С. З. Борные кислоты в процессах пегматитового и гидротермального минералообразования: петрологические следствия открытия сассолина (H_3BO_3) во флюидных включениях // Петрология. 2000. Т. 8. № 3. С. 241—266.

Перетяжко И. С., Смирнов С. З., Котельников А. Р., Котельникова З. А. Экспериментальное изучение системы $\text{H}_3\text{BO}_3\text{—NaF—SiO}_2\text{—O}_2$ при 350—800 °С и 1—2 кбар методом синтетических флюидных включений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 4. С. 450—472.

Петрова З. И., Макрыгина В. А., Антипин В. С. Петролого-геохимическая корреляция гранитов рапакиви и кислых вулканитов в южном обрамлении Сибирской платформы // Петрология. 1997. Т. 5. № 3. С. 291—311.

Савельева В. Б., Базарова Е. П. Геохимические особенности, условия кристаллизации и потенциальная рудоносность раннепротерозойского приморского комплекса гранитов рапакиви (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2012. № 2. С. 147—168.

Таусон Л. В., Петрова З. И., Собаченко В. И., Левицкий В. И., Левковский Р. З., Дагелайская И. Н., Рехвиашвили О. И. Геохимический тип гранитов рапакиви // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265. № 3. С. 721—726.

Шаталов Н. Н. Дайки докембрийских редкометалльных онгонитов Украинского щита // Известия АН СССР. Сер. геол. 1991. № 4. С. 36—52.

Buriánek D., Novák M. Morphological and compositional evolution of tourmaline from nodular granite at Lavičky near Velké Meziříčí, Moldanubicum, Czech Republic, 2004 // J. Czech Geol. Soc. 2004. Vol. 49. N 1—2. P. 81—90.

Dall'Agnol R., Teixeira N. P., Rämö O. T., Moura C. A. V., Macambira M. J. B., de Oliveira D. C. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil // Lithos. 2005. Vol. 80. P. 101—129.

Haapala I., Lukkari S. Petrological and geochemical evolution of the Kumi stock, a topaz granite cupola within the Wiborg rapakivi batholith, Finland // Lithos. 2005. Vol. 80. P. 347—362.

Henry D. J., Guidotti C. V. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine // Amer. Miner. 1985. Vol. 70. P. 1—15.

London D., Morgan G. B. VI, Wolf M. B. Boron in granitic rocks and their contact aureoles / Grew E. S., Anovitz L. (eds). Boron: mineralogy, petrology and geochemistry in the earth's crust (Reviews in Mineralogy. Vol. 33). Mineralogical Society of America, Washington, 1996. P. 299—330.

Pichavant M., Manning D. Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites: the contribution of experimental data // Phys. Earth and Planet. Interiors. 1984. Vol. 35. P. 31—50.

Rozendaal A., Bruwer L. Tourmaline nodules: indicators of hydrothermal alteration and Sn-Zn-(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa // J. African Earth Sci. 1995. Vol. 21. N 1. P. 141—155.

Sinclair W. D., Richardson J. M. Quartz-tourmaline orbicules in the Seagull Batholith, Yukon Territory // Canad. Miner. 1992. Vol. 30. P. 923—935.

Thomas R., Förster H.-J., Heinrich W. The behaviour of boron in a peraluminous granite-pegmatite system and associated hydrothermal solutions: a melt and fluid-inclusion study // Contrib. Miner. Petrol. 2003. Vol. 144. P. 457—472.

Trumbull R. B., Krienitz M.-S., Gottesmann B., Wiedenbeck M. Chemical and boron-isotope variations in tourmalines from an S-type granite and its source rocks: the Erongo granite and tourmalinites in the Damara Belt, Namibia // Contrib. Miner. Petrol. 2008. Vol. 155. P. 1—18.

Veksler I. V., Thomas R. An experimental study of B-, P- and F-rich synthetic granite pegmatite at 0.1 and 0.2 GPa // Contrib. Miner. Petrol. 2002. Vol. 143. P. 673—683.

Wolf M. B., London D. Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite // Contrib. Miner. Petrol. 1997. Vol. 130. P. 12—30.

Поступила в редакцию
24 декабря 2012 г.