

УДК 550.4:549.2/.8

## ГЕОХИМИЯ ТУРМАЛИНА ГРЕЙЗЕНОВ И ПЕГМАТИТОВ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович,

anzerger@mail.ru

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,  
Россия, 659333, г. Бийск, ул. Советская, 11.

**Актуальность** проведенных исследований определяется необходимостью геохимического изучения турмалина грейзеновых и пегматитовых месторождений и проявлений Горного Алтая. С грейзенами и пегматитами пространственно и генетически связаны различные типы оруденения: грейзеновые вольфрамовые, бериллиевые, редкометалльные пегматитовые и ювелирно-поделочное сырьё.

**Цель исследования:** изучение состава турмалина грейзеновых и пегматитовых месторождений и проявлений с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности формирования грейзенов и пегматитов.

**Методы.** Определение главных элементов в турмалине выполнены на волновом микрозонде JEOL JXA-8100 (в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН г. Новосибирск); изучение микроэлементного состава турмалина с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «ОПТИМА&4300» с высокой чувствительностью определения элементов в Лабораториях Всероссийского геологического исследовательского института (г. Санкт-Петербург) и Института минералогии и геохимии редких элементов (г. Москва). Изотопный состав кислорода определен на масс-спектрометре МИ 1201В в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск).

**Результаты.** Приведены данные по составу турмалина грейзеновых и пегматитовых месторождений и проявлений Горного Алтая. Алюмосиликат бора отнесён к шерлу и оксишерловому фойтиту. Турмалин грейзеновых и пегматитовых месторождений Горного Алтая имеет значительные геохимические отличия по содержаниям элементов-примесей, кислотности-основности кристаллизации минералов, характеру проявления ТЭФ РЗЭ М- типа. Турмалин наиболее эволюционированных, дифференцированных мигматитовых пегматитов резко отличается от шерла других объектов повышенными концентрациями Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc, Mn и обильным содержанием водных флюидов с такими летучими компонентами, как F, B, Cl, Li. Наиболее высокие концентрации W в турмалине грейзенов и Nb в шерле пегматитов обусловлены повышенной кислотностью среды флюидов. Преобладающая часть турмалина в изученных месторождениях не подчиняется заряд-радиус-контролируемому поведению элементов. Для турмалинов грейзенов и пегматитов с самыми высокими концентрациями вольфрама отмечается подчинение заряд-радиус-контролируемому поведению элементов.

### Ключевые слова:

Геохимия, грейзены, редкометалльные пегматиты, шерл, оксишерловый фойтит, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, редкоземельные элементы, W, Mo, Be, Li, Ta, Nb, U, Sc, Горный Алтай.

### Введение

Турмалин – один из широко распространённых боросиликатных минералов в природных породах. Он содержит ~3 вес. % В – элемента, который присутствует в низких концентрациях в большинстве коровых и мантийных пород [1, 2]; поэтому образование турмалина отвечает эффективной концентрации бора, даже если он кристаллизуется в породах континентальной коры. Такие концентрации достигаются двумя путями: 1) магматической дифференциацией, формируя турмалин в пегматитах, обогащённых бором как результат высокой несовместимости; 2) флюид-доминантными процессами, так как имеет место высоко флюид-мобильный характер бора. Последний, необходимый для образования турмалина во флюид-насыщенных породах, может заимствоваться и с другими фазами в пределах породы, такими как глинистые минералы или слюды [3], или привноситься внешними флюидами в процессе метасоматизма [4]. Турмалин относится к высокостабильным фазам в различных породных типах в широком диапазоне P–T условий от поверхностных условий до значительных P–T поля стабильности алмаза, превышающих верхне-мантийные показатели [5–7]. Турмалин формируется при широкой вариации давле-

ний и температур, включая условия в субдуцирующем слэбе на глубинах ~250 км [8]. Он чувствителен к различным физико-химическим условиям и является идеальным индикатором условий образования и обстановок, при этом заметно меняет состав элементов-примесей [9, 10].

В Горном Алтае турмалин (шерл) встречается в турмалиновых лейкогранитах, пегматитах, грейзенах, жилах гидротермального типа. **Цель исследования** – проанализировать геохимические особенности турмалина пегматитов и грейзенов, имеющих важное значение при формировании оруденения W, Mo, Sc, Be, Zr, Ta, Nb, U, REE.

### Геохимические особенности турмалина Горного Алтая

Наибольшим распространением турмалин пользуется на территории региона в грейзенах и пегматитах, где он ассоциирует с главными фазами полевых шпатов, кварца и слюд. В грейзенах Горного Алтая основная ассоциация, в которую входит турмалин, включает кварц, мусковит, вольфрамит, берилл, молибденит, пирит, халькопирит, редко висмутин. В грейзеновых месторождениях турмалин ассоциирует с минералами руд W, Mo, Sc, Be, а в пегматитовых образованиях – с Zr, Ta, Nb, U, REE.

**Таблица 1.** Химический состав турмалинов грейзеновых месторождений Горного Алтая (%)

**Table 1.** Chemical composition of tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai (%)

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO <sub>2</sub>	41,5	41,3	41,2	39,9	38,3	41,4	41,3	41,2	39,8	38,9	39,9	38,8
TiO <sub>2</sub>	0,5	1,2	0,8	0,7	0,6	0,5	1,1	0,7	0,7	0,64	0,7	0,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,9	32,2	32,1	33,6	32,3	31,9	32,1	32,2	33,5	32,3	33,9	32,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,3	15,1	18,9	14,2	14,0	19,3	15,0	19,1	14,1	14,3	14,1	14,0
MnO	0,12	0,4	0,7	0,1	0,13	0,12	0,5	0,6	0,2	0,11	0,14	0,13
MgO	1,25	2,2	1,2	2,3	2,1	1,25	2,2	1,5	2,1	2,13	2,2	2,03
CaO	0,66	0,63	1,1	0,2	0,1	0,66	0,63	1,1	0,3	0,11	0,2	0,1
Na <sub>2</sub> O	2,1	1,9	0,9	1,6	1,2	2,1	1,9	0,86	1,6	1,22	1,6	1,27
K <sub>2</sub> O	0,1	0,5	0,1	0,1	0,05	0,1	0,5	0,11	0,13	0,08	0,1	0,05
F	0,7	0,3	0,2	1,0	1,2	0,7	0,3	0,3	1,2	1,42	1,0	1,23
B	2,8	2,9	2,85	2,82	2,88	2,8	2,9	2,81	2,84	2,8	2,81	2,82

Примечание. 1, 2 – Кольванское (W, Mo); 3, 4 – Казандинское (Be); 5–8 – Южно-Калгутинское (W, Mo, Be); Кумирское (Sc, U, Be, REE) месторождение; 9, 10 – турмалин 1 генерации; 11 – турмалин 2 генерации; 12 – Дмитриевское (W).

Notes. 1, 2 – Kolyvanskoe (W, Mo); 3, 4 – Kazandinskoe (Be); 5–8 – Yuzhno-Kalgutinskoe (W, Mo, Be); Kumirskoe (Sc, U, Be, REE) 9, 10 – tourmaline of the 1<sup>st</sup> generation, 11 – tourmaline of the 2<sup>nd</sup> generation; 12 – Dmitrievskoe (W).

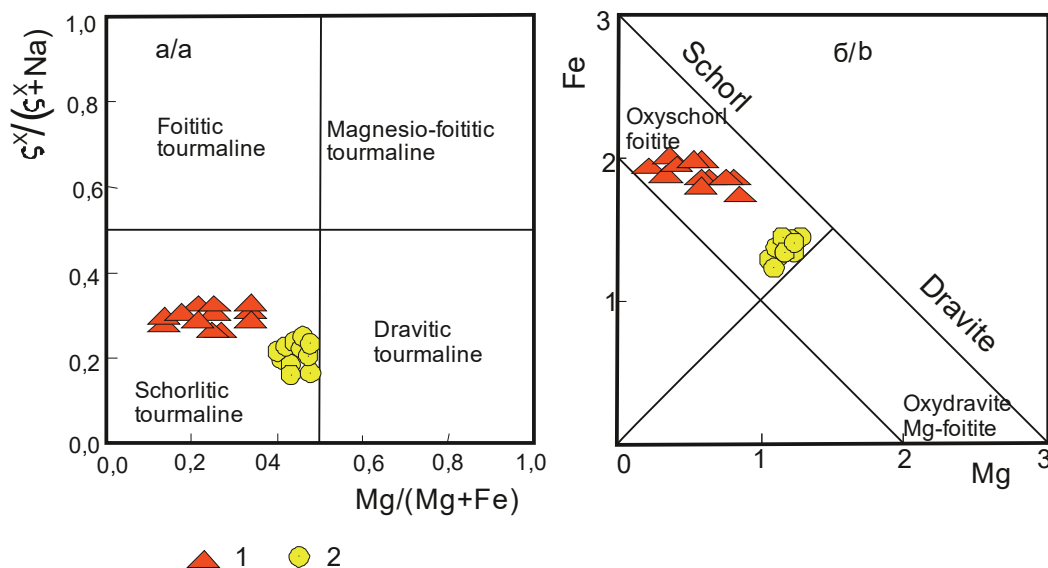
Такая металлогеническая специфика грейзенов и пегматитов региона очевидно отразилась и на геохимических особенностях турмалина.

Составы турмалинов грейзеновых месторождений Горного Алтая приведены в табл. 1 и 2, пегматитовых – в табл. 3 и 4.

Согласно общепринятой номенклатуре турмалинов, анализируемые образцы турмалина относятся к щелочным разновидностям по [11]. Номенклатура турмалинов грейзеновых и пегматитовых месторождений отражена на рис. 1. На обоих диаграммах фигуративные точки составов турмалинов пегматитов и грейзенов образуют самостоятельные кластеры. По соотношению  $\zeta^x/(\zeta^x+Na)$  –

Mg/Mg+Fe) анализируемый турмалин попадает в поле шерла, однако для пегматитовых объектов он ближе к границе дравита. В координатах Fe-Mg кластеры составов турмалина попадают в поле оксишерлового фойтита и пегматитовый боросиликат ближе к оксидравитовому магнезиальному фойтиту (рис. 1).

Наиболее высокие концентрации суммы редких земель свойственны шерлам грейзенового Кольванского W-Mo и второй генерации Кумирского Sc, U, Be, REE месторождений. Отношение  $(La/Yb)_N$  в турмалине всех объектов варьирует от 0,75 до 24,6, указывая на различную дифференцированность распределения лёгких и тяжёлых РЗЭ.



**Рис. 1.** Бинарные диаграммы  $\zeta^x/(\zeta^x+Na)$ –Mg/Mg+Fe (a) и Fe–Mg (b) в атомных количествах по [11] для турмалинов грейзеновых и пегматитовых месторождений Горного Алтая. Турмалин: 1 – грейзенов, 2 – пегматитов

**Fig. 1.** Binary diagram  $\zeta^x/(\zeta^x+Na)$ –Mg/Mg+Fe (a) and Fe–Mg (b) in atomic amount after [11] for tourmaline greisen and pegmatitic deposits of Gorny Altai. Tourmaline: 1 – greisens, 2 – pegmatites

**Таблица 2.** Элементы-примеси в турмалине грейзеновых месторождений Горного Алтая (г/т)

**Table 2.** Elements-admixture in tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai (ppm)

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V	28,5	30,1	219	220	5,6	5,9	6,01	80,5	70,7	34,8	125,3	93
Cr	45,7	47,3	5,6	6,1	4,5	4,8	5,18	31,6	113	45,0	185,2	5,3
Co	5,57	5,8	6,0	5,8	0,6	0,7	0,65	14,2	18,6	12,4	104,3	5,5
Ni	26,6	29,3	11	10,5	1,0	1,1	1,0	31,4	21,6	20,6	74,4	3,6
Cu	232	241	134	136	25,0	25,1	24,9	3,16	4,8	5,5	273,3	13,6
Zn	616	621	65	67	251	250	247	67,2	79,9	65,6	27,6	30,6
Rb	44,3	45,2	86,9	87	543	545	534	18,6	30,1	62,1	5,1	2
Sr	249	251	185	190	18,4	18,8	19,1	150	73,2	94,6	20,8	97,4
Nb	9,8	10,0	1,43	2,3	54,0	54,1	53,1	3,05	6,27	12,5	30,1	2,94
Cs	8,62	9,3	10,5	11,5	596	599	623	0,66	0,61	0,7	10,2	0,36
Ba	871	882	90,7	92,1	32,6	32,7	33,8	49,7	79,6	29,5	50,3	5,57
Pb	1588	1479	52	55	50,5	50,1	49,0	5,02	6,09	7,1	15,7	6,9
Th	10,4	11,2	5,06	5,2	2,55	2,5	2,41	1,35	1,24	11,3	5,1	4,23
La	65,4	71,6	5,79	5,9	2,73	2,7	2,63	3,41	3,66	5,86	70,4	10,4
Ce	153	198	15,8	20,5	8,9	7,9	6,69	7,34	7,98	11,4	175,1	20,3
Pr	17,3	18,4	2,41	2,2	0,91	0,9	0,88	1,13	1,18	1,89	18,6	1,7
Nd	58	60,4	7,59	7,7	3,3	3,2	3,13	6,61	5,96	8,91	75,4	5,26
Sm	10,4	11,9	1,23	1,5	1,4	1,3	1,04	2,26	2,31	5,41	15,2	0,49
Eu	0,36	0,34	0,34	0,35	0,06	0,05	0,04	0,66	0,96	0,09	0,5	0,13
Gd	4,72	5,9	0,98	1,0	1,1	0,97	0,89	2,43	2,78	6,99	10,5	0,43
Tb	0,57	1,98	0,16	0,18	0,3	0,2	0,19	0,52	0,55	1,73	1,8	0,072
Dy	2,99	9,1	0,77	0,9	1,67	1,8	1,75	2,98	3,87	9,27	7,3	0,51
Ho	0,63	0,91	0,15	0,2	0,5	0,4	0,36	0,57	0,82	1,42	0,9	0,12
Er	2,19	3,2	0,64	0,8	1,3	1,2	1,06	1,7	2,24	3,16	1,7	0,48
Tm	0,48	0,51	0,12	0,14	0,29	0,27	0,26	0,28	0,36	0,37	0,25	0,091
Yb	4,15	5,0	1,12	2,2	2,4	2,2	2,09	1,86	2,07	2,11	4,8	0,85
Lu	0,97	1,1	0,29	0,3	0,4	0,39	0,38	0,25	0,36	0,28	0,6	0,15
Y	17,7	21,7	4,34	4,65	12,6	12,0	11,9	19,2	23,6	82,0	83,7	4,97
Ga	73,3	89,4	55	58	31,7	31,2	30,0	13,8	12,4	14,3	18,5	54,6
Zr	20,8	22,5	9,02	10,2	18,8	16,8	17,8	56,6	247	60,1	18,7	0,5
Sc	9,0	10,5	10,9	11,5	8,7	8,3	8,29	6,9	8,16	10,5	125,8	7,9
Hf	1,41	1,5	0,26	0,3	1,7	1,3	1,24	1,54	5,82	0,73	2,5	0,14
Ta	2,37	3,6	0,16	0,2	7,2	7,0	6,92	0,23	0,46	3,76	11,8	1,31
Mo	21,5	22,7	44,3	45,6	45,9	45,2	44,4	9,4	16,5	10,4	2,1	7,31
Sb	2,1	2,5	3,0	3,1	1,7	1,6	1,61	5,01	4,23	4,4	10,1	5,8
Sn	5,2	6,2	6,2	7,0	4,9	4,5	4,77	81,5	102	97	1,2	3,6
Be	5,01	6,0	23,9	24,6	7,9	7,8	7,23	1,88	1,66	10,4	5,7	7,0
W	16,2	18,9	66,1	65,6	15,6	12,6	12,1	16,5	44,9	16,9	2,6	12,9
U	2,35	3,1	0,67	0,7	29,9	29,7	28,8	0,56	0,74	2,31	2,5	0,18
Li	355	363	402	412	451	453	748	47,5	68,9	70,5	18,7	20,6
Ge	3,5	4,1	4,0	4,2	2,7	2,5	2,3	1,61	1,37	1,5	5,7	1,48
Ag	0,4	0,5	0,34	0,36	0,24	0,23	0,22	0,013	0,023	0,02	0,6	1,6
Bi	3,0	3,2	2,5	2,7	2,8	2,9	2,83	0,44	1,12	1,2	13,7	14,1
ΣREE	398,9	415,2	41,73	48,52	49,6	35,48	33,3	51,2	58,7	140,9	466,7	45,95
(La/Yb) <sub>N</sub>	10,4	9,48	3,4	1,76	0,75	0,82	0,83	1,21	1,17	1,83	9,67	8,05
Eu/Eu*	0,14	0,11	1,02	0,86	0,14	0,13	0,12	0,87	1,17	0,04	0,12	0,86
TE <sub>1,3</sub>	1,0	1,65	1,16	1,2	1,19	1,16	1,15	1,01	0,99	1,14	1,2	1,03

Примечание. Нормализация по [12]. TE<sub>1,3</sub> – тетрадный эффект фракционирования REE, как среднее между первой и третьей тетрадами по [13]. 1, 2 – Кольванское (W, Mo); 3, 4 – Казандинское (Be); 5–8 – Южно-Калгутинское (W, Mo, Be); Кумирское (Sc, U, Be, REE) месторождение; 9, 10, – турмалин 1 генерации; 11 – турмалин 2 генерации; 12 – Дмитриевское (W).

Notes. Normalization carry to hondrite [12]. TE<sub>1,3</sub> – tetradic effect of REE fractionation, as an average between the first and the third tetrads after [13]. 1, 2 – Kolyvanskoe (W, Mo); 3, 4 – Kazandinskoe (Be); 5–8 – Yuzhno-Kalgutinskoe (W, Mo, Be); Kumirskoe (Sc, U, Be, REE) deposits; 9, 10 – tourmaline of the 1<sup>st</sup> generation, 11 – tourmaline of the 2<sup>nd</sup> generation; 12 – Dmitrievskoe (W).

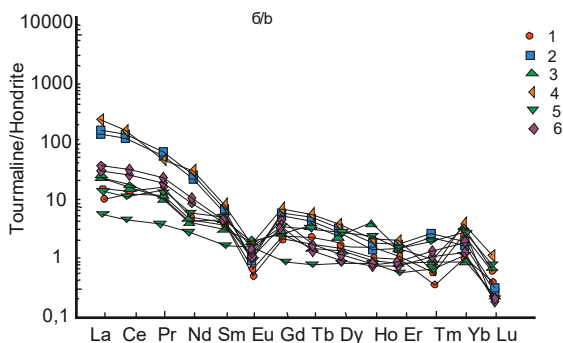
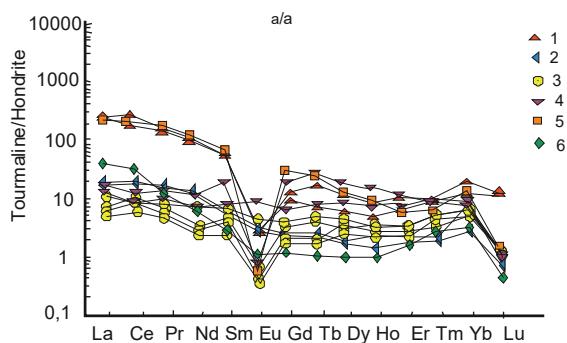
В отличие от грейзенов основная ассоциация турмалина в пегматитах охватывает альбит, ортоклаз, гранат (альмандинового ряда), биотит, редко мусковит.

Во всех пробах турмалина кроме Кумирского и Казандинского месторождений наблюдается нега-

тивная аномалия по европию (Eu/Eu\* < 1). Почти повсеместно в пробах шерла проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа (превышение порогового значения TE<sub>1,3</sub> > 1,1). Турмалин 2 генерации Кумирского скандий-уран-бериллий-редкоземельного месторождения можно

относи к Sc-обогащённому (Sc 125,8 г/т) и REE-обогащённому ( $\Sigma$ REE 466,7 г/т) турмалину по [14]. Именно в этой генерации турмалина Кумирского месторождения отмечены самые высокие концентрации таких мантийных элементов, как Cr, V, Co, Ni, Nb (табл. 2). Это является косвенным подтверждением того, что скандиевое оруденение в «тёмных рудах» на месторождении связано с базальтоидной магмой [15].

Распределение редкоземельных элементов в турмалине приведено на рис. 2. Почти во всех пробах турмалина грейzenов и пегматитов региона отчётливо видна негативная аномалия по европию, за исключением турмалина 1 генерации Кумирского грейzenового месторождения и боросиликата пегматитового месторождения Проходная Грива (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение РЗЭ в турмалине грейzenовых и пегматитовых месторождений Горного Алтая: а) грейzenы; б) пегматиты. Грейzenовые месторождения: 1 – Кольванское (W, Mo); 2 – Казандинское (Be); 3 – Южно-Калгутинское (W, Mo, Be); Кумирское (Sc, U, Be, РЗЭ); 4 – турмалин 1 генерации; 5 – турмалин 2 генерации; 6 – Дмитриевское (W). Пегматитовые месторождения: 1 – Точильное (Ta-Nb); 2 – Берёзовское (Ta-Nb); 3 – Раиса (Ta-Nb); 4 – Устауриха (Ta-Nb); 5 – Проходная Грива (Ta-Nb); 6 – Даниловское (Ta-Nb-Sc-REE)

**Fig. 2.** Distribution of REE in tourmaline of greisen and pegmatite deposits of Gorny Altai: a) greisens; b) pegmatites. Greisen deposits: 1 – Kolyvanskoe (W, Mo); 2 – Kazandinskoe (Be); 3 – Yuzhno-Kalgutinskoe (W, Mo, Be); Kumirskoe (Sc, U, Be, REE); 4 – tourmaline of the 1<sup>st</sup> generation, 5 – tourmaline of the 2<sup>nd</sup> generation, 6 – Dmitrievskoe (W). Pegmatite deposits: 1 – Tochilnoe (Ta-Nb); 2 – Berezovskoe (Ta-Nb); 3 – Raisa (Ta-Nb); 4 – Ustaurikha (Ta-Nb); 5 – Prokhodnaya Griva (Ta-Nb); 6 – Danilovskoe (Ta-Nb-Sc-REE)

В турмалине пегматитов месторождения Раисы, обогащенных мусковитом, отмечается зональность с блёкло-синим ядром, сероватой промежуточной частью и светло-жёлтой каёмкой (рис. 3). Зональность проявляется и в распределении элементов-примесей. В краевых частях наблюдается увеличение концентраций V, Cr, Co и Sr и уменьшение содержаний Mn, Ni, Zn, Sc и Ga.

**Таблица 3.** Химический состав турмалинов пегматитовых месторождений Горного Алтая (%)

**Table 3.** Chemical composition of tourmaline of pegmatite deposits of Gorny Altai (%)

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	35,8	36,0	36,2	35,9	36,1	36,3	35,8	36,1	36,2	35,9	36,0
TiO <sub>2</sub>	0,6	0,3	0,4	0,55	0,33	0,35	0,53	0,31	0,34	0,42	0,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,0	33,1	33,2	33,2	33,4	33,3	33,2	33,4	33,3	33,1	33,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,1	9,95	9,98	10,0	9,91	9,95	10,0	9,97	9,96	10,1	10,2
MnO	0,05	0,5	0,45	0,06	0,55	0,49	0,06	0,54	0,49	0,6	0,8
MgO	4,4	4,6	4,55	4,45	4,51	4,52	4,45	4,51	4,52	4,4	4,6
CaO	0,4	0,7	0,7	0,38	0,73	0,72	0,38	0,73	0,72	0,4	0,7
Na <sub>2</sub> O	1,9	2,0	0,8	1,93	2,2	0,81	1,93	2,2	1,81	1,9	2,0
K <sub>2</sub> O	0,15	0,2	0,25	0,17	0,2	0,23	0,17	0,2	0,23	0,15	0,2
F	1,7	1,8	1,8	1,77	1,83	1,8	1,77	1,83	1,8	1,75	1,88
B	2,96	3,0	2,97	2,98	3,1	2,95	2,98	3,1	2,95	3,06	3,4

Примечание. 1, 2 – Точильное; 3, 4 – Берёзовское; 5, 6 – Раиса; 7 – Устауриха; 8, 9 – Проходная Грива; 10, 11 – Даниловское.

Notes. 1, 2 – Tochilnoe; 3, 4 – Berezovskoe; 5, 6 – Raisa; 7 – Ustaurikha; 8, 9 – Prokhodnaya Griva; 10, 11 – Danilovskoe.



**Рис. 3.** Зональный кристалл турмалина с включениями ильменита проявления Раиса. Николи скрещены

**Fig. 3.** Zone crystal of tourmaline with inclusions of ilmenite of manifestation Raisa. Cross-polarized light

### Физико-химические особенности рудных процессов

Для выяснения физико-химических особенностей процессов кристаллизации турмалина в пегматитах и грейzenах изучены температуры гомоген-

**Таблица 4.** Элементы-примеси в турмалине (шерле) пегматитовых месторождений Горного Алтая (г/т)

**Table 4.** Elements-admixture in tourmaline of pegmatites deposits of Gorny Altai (ppm)

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V	2,5	3,2	66,4	62,5	76,8	55,8	64,8	81,2	78,6	32,9	44,6
Cr	3,86	3,5	7,5	7,3	8,1	7,8	7,4	4,35	4,2	3,76	4,9
Co	3,5	3,6	3,4	3,8	3,9	4,0	4,0	4,1	4,1	1,1	2,4
Ni	2,5	2,7	2,6	3,0	2,9	2,8	3,1	3,2	3,2	0,9	1,6
Cu	10,1	9,8	9,7	10,3	10,2	11,7	11,8	11,9	12,9	15,6	16,7
Zn	12,5	12,7	11,8	11,9	12,0	12,1	13,5	14,1	15,3	21,5	22,7
Rb	33,9	45,8	35,1	37,4	15,9	17,9	38,6	21,7	22,7	16,4	18,9
Sr	5,89	6,8	4,6	5,2	28	30,6	6,9	29,1	31,3	35,0	37,8
Nb	14,6	13,2	4,4	4,5	3,61	4,2	5,2	11,38	5,6	6,46	7,1
Cs	5,83	6,6	2,6	2,9	0,96	1,2	3,1	1,92	2,7	2,36	3,2
Ba	6,12	8,4	11,3	12,1	23,6	26,8	13,7	7,89	8,8	34,5	35,7
Pb	12,0	12,1	13,1	13,2	13,5	13,6	14,2	14,7	14,8	16,5	17,4
Th	1,34	1,9	24,2	25,6	2,87	3,3	25,9	0,5	0,9	0,74	0,8
U	1,61	1,1	1,7	2,4	2,08	2,2	3,4	3,54	1,8	0,64	0,66
La	3,24	5,3	47	51,6	6,44	8,9	52,7	2,41	5,4	8,93	9,5
Ce	10,7	11,1	87,6	88,7	13,1	14,5	89,4	4,66	11,7	18,7	18,9
Pr	1,45	1,9	6,47	6,6	1,26	1,3	6,4	0,39	2,0	2,08	2,2
Nd	4,43	4,5	16,7	17,8	4,3	4,5	18,6	1,28	4,6	6,73	6,8
Sm	1,26	1,3	1,88	1,97	0,9	1,2	2,1	0,28	1,9	0,98	0,99
Eu	0,033	0,05	0,097	0,09	0,15	0,16	0,09	0,1	0,06	0,055	0,06
Gd	0,76	0,9	1,7	1,8	0,78	0,91	2,1	0,24	1,8	0,71	0,8
Tb	0,13	0,2	0,24	0,34	0,11	0,21	0,4	0,037	0,3	0,065	0,07
Dy	0,75	0,92	1	1,2	0,62	1,1	1,3	0,27	1,1	0,26	0,27
Ho	0,12	0,2	0,13	0,2	0,11	0,3	0,15	0,057	0,24	0,041	0,05
Er	0,36	0,4	0,39	0,43	0,26	0,31	0,44	0,14	0,44	0,14	0,21
Tm	0,062	0,2	0,07	0,1	0,035	0,04	0,2	0,029	0,11	0,031	0,04
Yb	0,62	1,6	0,56	0,9	0,31	1,5	1,6	0,22	1,2	0,24	0,7
Lu	0,094	0,2	0,087	0,1	0,043	0,3	0,34	0,037	0,3	0,031	0,05
Y	4,19	8,4	5,2	6,4	3,05	5,7	7,9	1,76	7,8	1,53	2,6
Ga	104	115	71,5	72,5	88,4	90,4	76,5	51,6	77,8	120,0	123,8
Zr	14,7	17,8	9,1	10,2	21,3	22,7	15,8	12,5	12,8	15,2	15,8
Sc	7,6	7,7	8,0	8,3	9,1	9,3	9,7	9,0	8,7	95,6	88,9
Hf	2,42	3,5	0,42	0,45	0,71	1,7	0,55	0,99	0,6	0,68	0,7
Ta	6	7,5	7,35	7,4	2,32	3,2	7,3	1,08	1,6	0,67	0,71
Mo	0,94	2,7	1,52	1,6	4,23	5,7	2,1	1,75	1,98	1,21	1,32
Sb	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,2	3,3	3,8	3,7	0,9	1,0
Sn	9,0	8,7	8,9	9,9	9,8	10,5	10,6	12,0	12,6	6,3	6,9
Be	2,4	4,5	8,3	9,1	3,12	4,8	9,5	4,79	10,5	8,64	9,1
W	19,1	23,7	29,2	30,4	49,9	45,8	32,6	16,2	33,6	15,0	16,8
Li	13,7	13,8	14,0	13,7	13,8	14,5	14,1	13,6	12,7	25,5	27,9
Ge	2,6	4,6	5,0	5,2	1,88	2,4	6,6	0,96	5,6	3,1	4,5
Ag	2,7	2,8	2,9	3,1	3,0	3,5	3,4	3,7	3,8	0,5	0,6
Bi	5,5	5,6	5,9	6,5	6,4	6,7	7,2	7,0	6,7	3,3	4,7
ΣPЗЭ	28,2	37,17	169,1	178,2	31,5	40,9	183,7	11,9	38,9	40,7	43,2
(La/Yb) <sub>N</sub>	3,4	2,2	55,2	39,0	13,7	3,9	21,7	7,2	3,0	24,6	8,8
Eu/Eu*	0,098	0,13	0,16	0,15	0,54	0,45	0,13	1,17	0,09	0,19	0,2
TE <sub>1,3</sub>	1,31	1,21	1,17	1,15	1,02	0,96	1,25	1,43	1,17	0,98	0,9

Примечание. 1, 2 – Точильное; 3, 4 – Берёзовское; 5, 6 – Раиса; 7 – Устауриха; 8, 9 – Проходная Грива; 10, 11 – Даниловское.

Notes. 1, 2 – Tochilnoe; 3, 4 – Berezovskoe; 5, 6 – Raissa; 7 – Ustaurikha; 8, 9 – Prokhnodnaya Griva; 10, 11 – Danilovskoe.

низации первичных газовой-жидких включений в кварце, ассоциирующем с турмалином, общая солёность включений и изотопы кислорода. Некоторые термодинамические показатели и изотопные данные кислорода приведены в табл. 5.

Приведенные данные показывают, что кварц и ассоциирующий с ним турмалин в пегматитах и грейзенах резко отличались по температурам кристаллизации, солёности газовой-жидких включе-

ний и содержанию тяжёлого изотопа кислорода. В пегматитах температуры гомогенизации первичных газовой-жидких включений, их солёность были более высокими, чем в грейзенах, а  $\delta^{18}\text{O}$  были выше чем, в хондритах и мантии (мантийное значение составляет  $5,7 \pm 0,3$ ). Температуры гомогенизации первичных газовой-жидких включений в кварце грейзенов варьировали от 385 до 410 °C, их солёность колебалась от 5,5 до 17,3 мас. %-экв.,

**Таблица 5.** Термобарогеохимические и изотопные данные исследований кварца в ассоциации с турмалином грейзенов и пегматитов региона

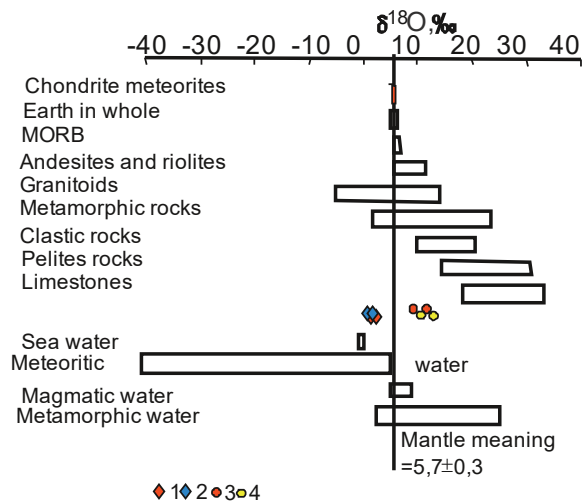
**Table 5.** Thermo-barogeochemical and isotope data of study of quartz in association with tourmaline of greisen and pegmatites of the region

Минерал Mineral	n	$T_{\text{гом.}}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{гом.}}, ^\circ\text{C}$	Солёность флюидных включений, мас. %-экв. Salinity of fluid inclusion, wt. %-equ.	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$ SMOW
Кварц в ассоциации с турмалином Берёзовского проявления пегматитов Quartz in association with tourmaline of Berezovskoe pegmatite manifestation	2	550–576	23–25	+10,9–+12,6
Кварц в ассоциации с турмалином Даниловского месторождения пегматитов Quartz in association with tourmaline of Danilovskoe pegmatite deposit	3	567–580	25–27	+11,2–+13,1
Кварц в ассоциации с турмалином Кольванского грейзенового месторождения Quartz in association with tourmaline of Kolyvanskoe greisen deposit	2	395–405	16,7–17,2	+1,2–+2,3
Кварц в ассоциации с турмалином Казандинского месторождения Quartz in association with tourmaline of Kazandinskoe deposit	2	402–410	15,2–17,3	+1,3–+2,1
Кварц грейзенов жилы 87 Калгутинского месторождения* Quartz of greisen lode 87 of Kalgutinskoe deposit	7	385	5,7–17,8	–

Примечание. n – количество замеров. Знаком \* отмечены данные по [16].

Notes. n – amount of tests. The data after [16] are marked with \*.

а содержание тяжёлого изотопа было ниже, чем в хондритах и мантии и варьировало от 1,2 до 2,3 ‰, что свидетельствует о смешении ювенильных флюидов с метеоритной водой. Последнее обстоятельство хорошо видно на рис. 4.



**Рис. 4.** Вариации  $\delta^{18}\text{O}$  в разных типах пород и вод по [17] и в кварце пегматитов и грейзенов региона. Кварц грейзенов месторождений: 1 – Кольванского, 2 – Казандинского; кварц пегматитовых месторождений: 3 – Берёзовского, 4 – Даниловского

**Fig. 4.** Variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in different types of rocks and waters after [17] and in quartz of pegmatite and greisen deposits of the region. Quartz of greisen deposits: 1 – Kolyvanskoe, 2 – Kazandinskoe; quartz of pegmatite deposits: 3 – Berezovskoe, 4 – Danilovskoe

#### Интерпретация результатов

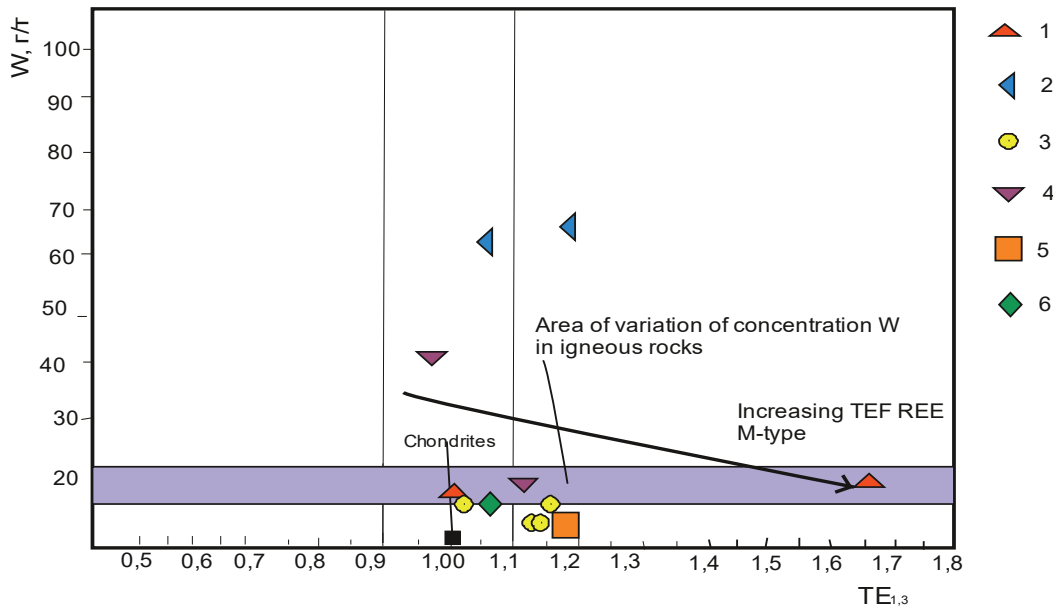
Важнейшим показателем в эндогенной геологии является проблема кислотности-основности среды. Многие исследователи единодушны в важной роли изменения кислотности среды, как одной из важнейших причин процессов минералообразо-

вания и рудогенеза [18, 19]. В.А. Жариковым [18] предложен условный потенциал ионизации минералов для количественной оценки кислотности-основности минералообразования. Чем выше потенциал ионизации минерала ( $y$ , какал/моль), тем выше кислотность.

Минералогическое изучение парагенезисов пегматитов и грейзенов региона показало, что в пегматитах турмалин чаще всего обнаруживается в зонах графических разностей, а его тесная ассоциация с определёнными минералами свидетельствует об относительно повышенной основности среды кристаллизации, по сравнению с грейзеновыми парагенезисами. Так, тесная ассоциация турмалина в пегматитах с альбитом ( $y=204,7$ ), ортоклазом ( $y=203,2$ ), мусковитом ( $y=201,6$ ), алмандином ( $y=197,8$ ), биотитом ( $y=188,7$ ) в аддитивной характеристике условного потенциала ионизации даёт намного меньшую его величину ( $y=199,2$ ), свидетельствуя о большей основности пегматитового парагенезиса.

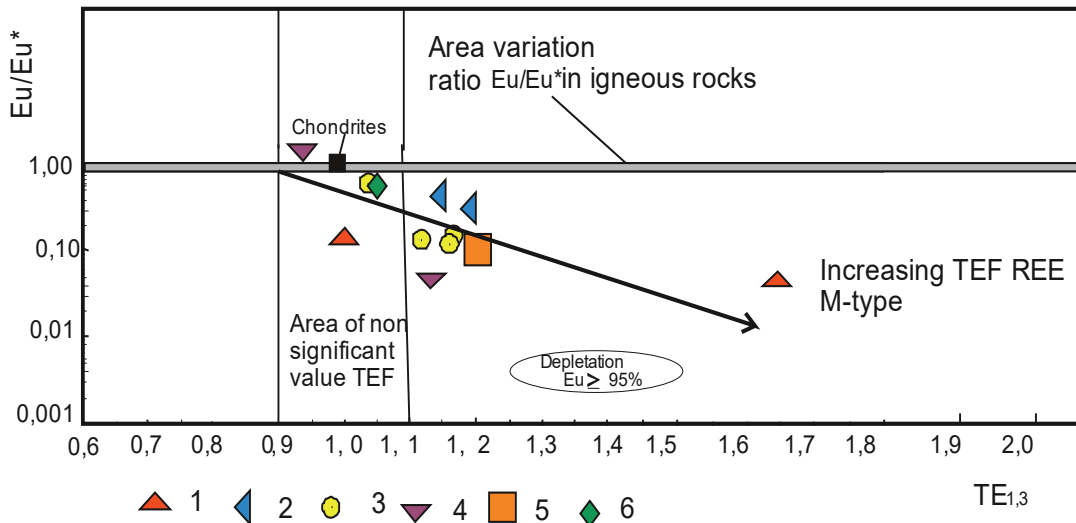
Аддитивная характеристика грейзенового парагенезиса ( $y=212,08$ ), где основную роль играет кварц ( $y=227,3$ ), мусковит ( $y=201,6$ ), вольфрамит, ( $y=203$ ), берилл ( $y=211,2$ ), молибденит ( $y=211,5$ ), пирит ( $y=218$ ), висмутин ( $y=212$ ), указывает на значительно более высокую кислотность среды минералообразования.

В грейзеновых месторождениях региона главную роль в рудах играет вольфрам. А его перенос в растворах и отложение в рудных телах осуществляется преимущественно фтор-комплексами, которые в значительной степени определяют особенности проявления ТЭФ РЗЭ М-типа. В связи с этим возникает вопрос о связи активности фтор-комплексов и эффективных концентраций  $W$  в турмалине гидротермально-пневматолитовых месторождений. Эта зависимость может быть определена на диаграмме соотношений концентраций  $W$  и величин ТЭФ РЗЭ М-типа для турмалина грейзено-



**Рис. 5.** Диаграмма  $W-TE_{1,3}$  по [20] для турмалина грейзеновых месторождений Горного Алтая. Серая область на диаграмме выделена на основании средних содержаний вольфрама в изверженных породах по [21]. Содержания вольфрама в хондритах по [22]. Условные обозначения те же, что на рис. 2, а

**Fig. 5.** Plot of  $W-TE_{1,3}$  after [20] for tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai. The gray area on the diagram is detached on the basis of average contents of tungsten in igneous rocks after [21]. Contents of tungsten in chondrites are after [22]. Legend is the same as in Fig. 2, a



**Рис. 6.** Диаграмма  $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$  в турмалине грейзеновых месторождений Горного Алтая. Условные обозначения те же, что на рис. 2, а

**Fig. 6.**  $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$  plot in tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai. Legend is the same as in Fig. 2, a

вых месторождений. Для грейзеновых месторождений Горного Алтая наблюдается уменьшение концентраций  $W$  со слабым увеличением величин ТЭФ РЗЭ М-типа (рис. 5).

Соотношение  $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$  в турмалине грейзеновых месторождений показывает снижение величин  $Eu/Eu^*$  с увеличением значений ТЭФ РЗЭ М-типа (рис. 6).

Увеличение величины ТЭФ REE М-типа коррелируется со слабым уменьшением значений  $Eu/Eu^*$ . Снижение величины  $Eu/Eu^*$  при проявлении

ТЭФ REE М-типа согласно рядам кислотности-щёлочности элементов [23] в спектре Sm, Gd, Eu (учувствуют в расчёте величин  $Eu/Eu^*$ ) в водно-серодородных растворах при стандартных условиях отвечает повышению щёлочности среды. А высокие концентрации  $W$  в турмалине грейзеновых месторождений интерпретируются более высокой кислотностью среды.

По соотношениям Y/No и Zr/Hf элементы турмалина грейзеновых месторождений в основном не подчиняются заряд-радиус-контролируемому по-

ведению, за исключением единичных проб Казандинского и первой генерации Кумирского месторождений (рис. 7), для которых характерны повышенные концентрации вольфрама и положительное значение отношений  $Eu/Eu^*$ . Вероятно, неконтролируемое зарядом и радиусом поведение элементов (non-charge-and-radius-controlled) [24] встречается чаще всего в высоко эволюционированных расплавах системах, которые обогащены  $H_2O$ ,  $CO_2$  и летучими компонентами, такими как Li, B, F и/или Cl на переходной стадии от силикатного расплава к водным флюидам [25]. В нашем случае максимальные концентрации вольфрама в турмалине грейзенов отвечает заряд-радиус-контролируемому поведению элементов.

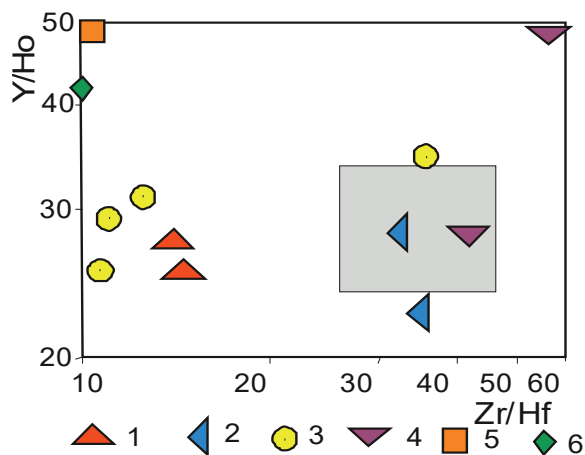


Рис. 7. Диаграмма Y/Ho–Zr/Hf в турмалинах грейзеновых месторождений Горного Алтая. Серое поле HARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED) на диаграмме выделено по [24]. Условные обозначения – на рис. 2, а

Fig. 7. Plot of Zr/Hf–Y/Ho for rocks of Makarevsky range. Gray field HARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED) is after [24]. Legend is in Fig. 2, a

В пегматитах региона наибольшее значение имеет тантал-ниобиевое оруденение. Для выяснения физико-химических особенностей формирования этого типа оруденения построена диаграмма соотношений Nb–TE<sub>1,3</sub> в турмалине пегматитовых месторождений (рис. 8). В этом случае увеличение концентраций ниобия в турмалине происходит с повышением значений ТЭФ РЗЭ М-типа. При этом уровень концентраций ниобия в турмалине пегматитов находится в промежутке между хондритовыми значениями и содержаниями в изверженных горных породах.

Снижение значений  $Eu/Eu^*$  происходит с увеличением величины TE<sub>1,3</sub> (рис. 9), что согласуется с повышением щёлочности среды. А учитывая данные диаграмм 6 и 7, можно заключить, что более высокие концентрации Nb в турмалине пегматитов отвечают также повышению кислотности среды.

По соотношениям Y/Ho и Zr/Hf элементы турмалина пегматитовых месторождений также преимущественно не подчиняются заряд-радиус-контролируемому поведению, за исключением единственной пробы пегматитового месторождения «Раиса» (рис. 10). Для турмалина последнего характерны самые высокие концентрации вольфрама и низкие ниобия.

Из всех пегматитов Алтайского региона Даниловское месторождение отличается наибольшей эволюционной продвинутой и дифференцированностью, где в составе пегматитовых тел проявлены все зоны – кварцевое ядро, переходная, крупноблоковая. Турмалин из этих пегматитов характеризуется повышенными концентрациями Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc. В них самые низкие значения тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ, а также минимальные концентрации Co, Ta, Mo, Sb, Ag, Bi. Для турмалина более эволюционированных пегматитов Требицкого плутона (Греция) повышенные концентрации отмечены для таких эл-

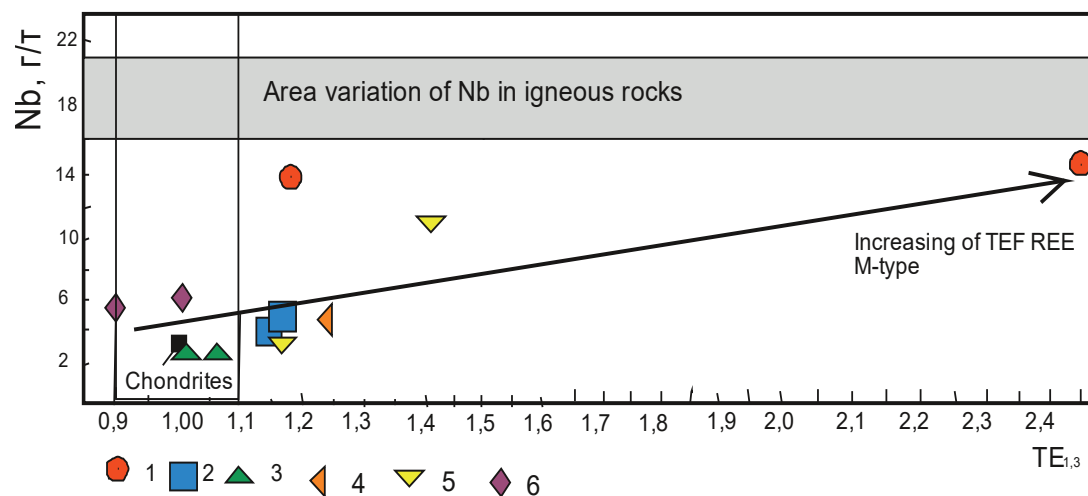
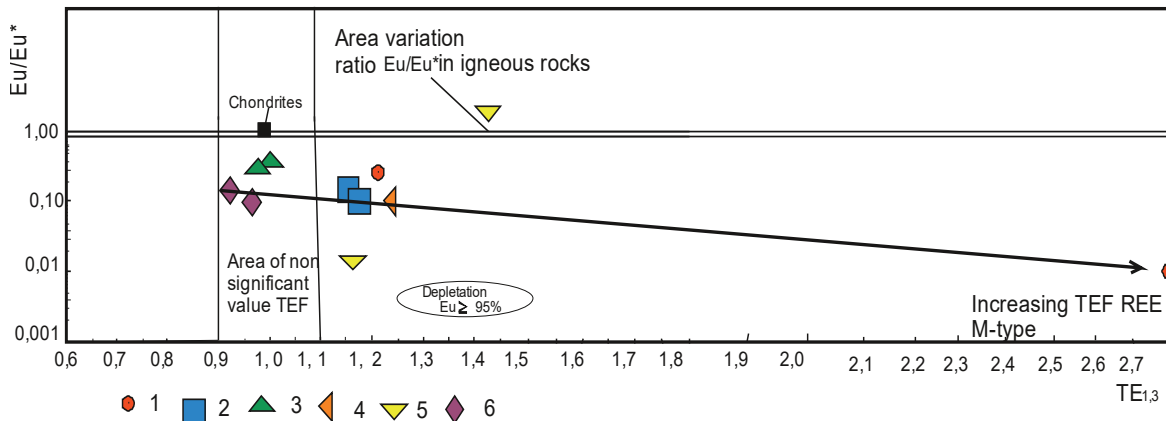


Рис. 8. Диаграмма Nb–TE<sub>1,3</sub> для турмалина пегматитовых месторождений Горного Алтая. Серая область на диаграмме выделена на основании средних содержаний вольфрама в изверженных породах по [21]. Содержания вольфрама в хондритах по [22]. Условные обозначения – на рис. 2, б

Fig. 8. Plot of Nb–TE<sub>1,3</sub> for tourmaline of pegmatite deposits of Gorny Altai. The gray area on diagram is detached on the basis of average contents of niobium in igneous rocks after [21]. Contents of niobium in chondrites is after [22]. Legend is in Fig. 2, b

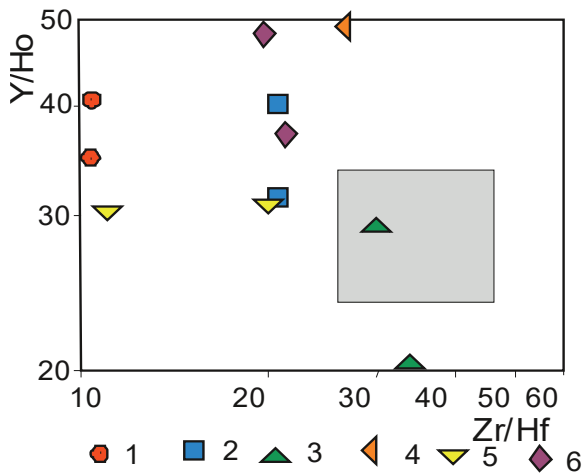




**Рис. 9.** Диаграмма  $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$  в турмалине пегматитовых месторождений Горного Алтая. Условные обозначения те же, что на рис. 2, б

**Fig. 9.** Plot  $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$  in tourmaline of pegmatite deposits of Gorny Altai. Legend is the same as in Fig. 2, b

ментов, как Ni, Co, Zn, Ga, Sc, Ce [26]. Следовательно, Даниловский турмалин близок к боросиликату пегматитов Требицкого плутона, за исключением более низких концентраций Ni, Co.



**Рис. 10.** Диаграмма  $Y/Ho-Zr/Hf$  в турмалинах грейзеновых месторождений Горного Алтая. Серое поле HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) на диаграмме выделено по [24]. Условные обозначения – на рис. 2, б

**Fig. 10.** Plot of  $Zr/Hf-Y/Ho$  in tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai. Gray field HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) is marked after [24]. Legend is in Fig. 2, b

С другой стороны, шерл Даниловского месторождения может быть отнесён к Sc-обогащённой разновидности, обнаруживающей сходство с турмалином Краковичских пегматитов Молданубской зоны [14]. Для турмалина Краковичской зоны характерны высокие концентрации Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc и повышенное содержание Mn. В турмалине Даниловского месторождения также наблюдаются повышенные концентрации MnO (0,7...0,8 вес. %).

Во всех случаях в грейзенах и пегматитах турмалин тесно ассоциирует с мусковитом, то есть оба минерала содержат в своих формулах группу OH. Это предполагает участие высоководных и бор-обо-

гащённых флюидов [7]. Появление высоко эволюционированных пегматитов с миароловыми пустотами (Даниловское, Точильное месторождения) предполагает их образование из обогащённых летучими силикатных расплавов (от 10 до 50 %  $H_2O$ ) с обильными F, B, Cl, Li [27].

Наиболее высокие суммарные концентрации редких земель, а также тяжёлых РЗЭ характерны для грейзеновых месторождений Кольванского и Кумирского. Установлено, что повышенные концентрации тяжёлых РЗЭ в турмалине могут быть обусловлены формированием РЗЭ-фторидных комплексов в высокотемпературных пневматолито-гидротермальных растворах [28].

#### Заключение

Турмалин грейзеновых и пегматитовых месторождений Горного Алтая относится к шерлу и оксишерловому фойтиту и имеет значительные геохимические отличия по содержаниям элементов-примесей, кислотности-основности минералообразования, характеру проявления ТЭФ РЗЭ М-типа. Шерл 2 генерации Кумирского скандий-уран-бериллий-редкоземельного месторождения отнесён к Sc-обогащённому и REE-обогащённому турмалину. Боросиликат наиболее эволюционированных, дифференцированных миароловых пегматитов резко отличается от шерла других объектов повышенными концентрациями Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc, Mn и обильным содержанием водных флюидов с такими летучими компонентами, как F, B, Cl, Li. Наиболее высокие концентрации W в турмалине грейзенов и Nb в шерле пегматитов обусловлены повышенной кислотностью флюидов. Для турмалинов грейзенов и пегматитов с самыми высокими концентрациями вольфрама отмечается подчинение заряд-радиус-контролируемое поведения элементов. Редкоземельное обогащение турмалина грейзенов и особенно обогащение тяжёлыми редкоземельными элементами обусловлено формированием РЗЭ-фторидных комплексов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ryan J.G., Langmuir C.H. The systematics of boron abundances in young volcanic rocks // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – V. 57. – P. 1489–1498.
2. Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust // *Reviews in Geophysics*. – 1995. – V. 33. – P. 241–265.
3. Nakano T., Nakamura E. Boron isotope geochemistry of metasedimentary rocks and tourmalines in a subduction zone metamorphic suite // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2001. – V. 127. – P. 233–252.
4. Evolution of a tourmaline-bearing lawsonite eclogite from Elekdag area (Central Pontides, N Turkey): evidence for infiltration of slab-derived B-rich fluids during exhumation / R. Altherr, G. Topuz, H. Marschall, T. Zack, T. Ludwig // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2004. – V. 148. – P. 409–425.
5. Syros Metasomatic Tourmaline: Evidence for Very High- $\delta^{11}\text{B}$  Fluids in Subduction Zones / H.R. Marschall, T. Ludwig, R. Altherr, A. Kalt, S. Tonarini // *Journal of Petrology*. – 2006. – V. 47. – P. 1915–1942.
6. On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks / H.R. Marschall, A.V. Korsakov, G.L. Luvizotto, L. Nasdala, T. Ludwig // *Journal of the Geological Society*. – 2009. – V. 166. – P. 811–823.
7. Marschall H.R., Jiang S.-Y. Tourmaline isotopes: No Element Left Behind // *Elements*. – 2011. – V. 7. – P. 313–319.
8. Werding G., Schreyer W. Experimental studies on borosilicates and selected borates. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry // *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*. – 2002. – V. 33. – P. 117–163.
9. Hinsberg V.J., Henry D.J., Marschall H.R. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment // *Can Mineral*. – 2011. – V. 49. – P. 1–16.
10. Tourmaline as a petrogenetic monitor of the origin and evolution of the Berry-Havey pegmatite (Maine, U.S.A.) / E. Roda-Robles, W. Simmons, A. Pesquera, P.P. Gil-Crespo, J. Nizamoff, J. Torres-Ruiz // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 100. – P. 95–109.
11. Nomenclature of the tourmaline-supergruop minerals / D. Henry, M. Novak, F.C. Hawthorne et al. // *American Mineralogist*. – 2011. – V. 96. – P. 895–913.
12. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
13. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochim Cosmochim Acta*. – 1999. – V. 63. – № 3/4. – P. 49–71.
14. Sc- and REE-rich tourmaline replaced by Sc-rich REE-bearing epidote-group mineral from the mixed (NYF+LCT) Kracovice pegmatite (Moldanubian Zone, Czech Republic) / R. Copjakova, R. Tkoda, M.V. Galiova, M. Novak, J. Cempirek // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 100. – P. 1434–1451.
15. Гусев А.И., Гусев Н.И. Некоторые аспекты геохимии минералов Кумирского скандий-уран-редкоземельного месторождения Горного Алтая // *Успехи современного естествознания*. – 2014. – № 12. – С. 560–566.
16. Калгутинское редкометалльное месторождение (Горный Алтай): магматизм и рудогенез / А.А. Поцелуев, Л.П. Рихванов, А.Г. Владимиров, И.Ю. Анникова, Д.И. Бабкин, А.Ю. Никифоров, В.И. Котегов. – Томск: STT, 2008. – 226 с.
17. Rollinson H.R. Using geochemical data; evaluation, presentation. – Essex: London Group UK, 1994. – 352 p.
18. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов // *Геология рудных месторождений*. – 1967. – № 5. – С. 75–89.
19. Helgeson H.C. Thermodynamic of hydrothermal system at elevated temperatures // *Amer. J. Sci.* – 1969. – V. 267. – P. 35–58.
20. Гусев А.И., Гусев Н.И. Магматизм и оруденение Южно-Калгутинского месторождения Горного Алтая // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2016. – № 2 (26). – С. 110–120.
21. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // *Геохимия*. – 1962. – № 7. – С. 555–572.
22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1988. – V. 201. – P. 535–544.
23. Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности // *Сб.: Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений*. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.
24. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1995. – V. 119. – P. 213–223.
25. Veksler I.V. Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: a summary of experimental studies // *Chem. Geol.* – 2004. – V. 210. – P. 7–31.
26. Compositional trends in tourmaline from intragranitic NYF pegmatites of the Třebíč pluton, Czech Republic: an electron microprobe, Mössbauer and LA-ICP-MS study / M. Novak, R. Škoda, J. Filip, J. Macek, T. Vaculovič // *Can. Mineral.* – 2011. – V. 49. – P. 359–380.
27. Thomas R., Davidson P. Origin of miarolitic pegmatites in the Königshain granite/Lusatia // *Lithos*. – 2016. – V. 260. – P. 225–241.
28. Tourmaline as a recorder of magmatic-hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China / S.-Y. Yang, S.-Y. Jiang, K.-D. Zhao, B.-Z. Dai, T. Yang // *Contrib. Miner. Petrol.* – 2015. – V. 170. – P. 42–56.

Поступила 30.12.2017 г.

## Информация об авторах

**Гусев А.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин безопасности жизнедеятельности и туризма Естественно-географического факультета Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

UDC 550.4:549.2/8

## GEOCHEMISTRY OF TOURMALINE OF GREISENS AND PEGMATITES OF GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev,

anzerg@mail.ru

Shukshin Altai Humane-Pedagogical University,  
11, Sovetskaya street, Biysk, 659333, Russia.

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need of researching content of tourmaline of greisen and pegmatites of Gorny Altai. Different types of ore mineralization of greisens rare earth pegmatites and jeweler-ornamental stones are related to greisens and pegmatites spatially and genetically.

**The main aim** of the research is to study geochemical features of tourmaline greisens and pegmatites using the experimental diagrams, which allow solving the genetic problems and the physic-chemical features of forming greisens and pegmatites.

**The methods.** Basic elements in tourmaline were defined on wave microprobe JEOL JXA-8100 (Analytic Centre of Institute geology and mineralogy SB RAS (Novosibirsk)); rare and scattered elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometer «OPTIMA-4300», the rest elements, including REE, were determined by La-ISP-MS methods in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg) and IMGRE (Moscow). Oxygen isotope composition was defined on the mass-spectrometer MI 1201 V in Institute of geology and mineralogy SB RAS (Novosibirsk).

**Results.** The paper introduces the data on geochemistry and petrology of tourmaline from greisens and pegmatites of Gorny Altai. Aluminous silicate of bore refers to schorl and oxyschorl foitite. Tourmaline of greisens and pegmatites deposits of Gorny Altai have considerable geochemistry distinctions on contents elements-admixtures, acidic-basic of mineral crystallization, character of manifestation of TEF REE M-type. Tourmaline of more evolution, differentiated miarolitic pegmatites differ sharply from schorl of other objects in high concentration of Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc, Mn and abundant content of water fluids with such volatile components as F, B, Cl, Li. The highest concentration of W in tourmaline of greisens and Nb in schorl of pegmatites are caused by high acidity of fluid media. Predominant part of tourmaline in the studied deposits does not comply with the charge-radius-control behavior of elements. Tourmaline of greisen and pegmatites with high concentration of tungsten comply with charge-radius-control behavior of elements.

**Key words:**

Geochemistry, greisens, rare metal pegmatite, schorl, oxyschorl foitite, tetrad effect of REE fractionation, rare-earth elements, W, Mo, Be, Li, Ta, Nb, U, Sc, Gorny Altai.

## REFERENCES

- Ryan J.G., Langmuir C.H. The systematics of boron abundances in young volcanic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, vol. 57, pp. 1489–1498.
- Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews in Geophysics*, 1995, vol. 33, pp. 241–265.
- Nakano T., Nakamura E. Boron isotope geochemistry of metasedimentary rocks and tourmalines in a subduction zone metamorphic suite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, vol. 127, pp. 233–252.
- Altherr R., Topuz G., Marschall H., Zack T., Ludwig T. Evolution of a tourmaline-bearing lawsonite eclogite from Elekdag area (Central Pontides, N Turkey): evidence for infiltration of slab-derived B-rich fluids during exhumation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2004, vol. 148, pp. 409–425.
- Marschall H.R., Ludwig T., Altherr R., Kalt A., Tonarini S. Synchronous Metasomatic Tourmaline: Evidence for Very High- $\delta^{11}\text{B}$  Fluids in Subduction Zones. *Journal of Petrology*, 2006, vol. 47, pp. 1915–1942.
- Marschall H.R., Korsakov A.V., Luvizotto G.L., Nasdala L., Ludwig T. On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks. *Journal of the Geological Society*, 2009, vol. 166, pp. 811–823.
- Marschall H.R., Jiang S.-Y. Tourmaline isotopes: No Element Left Behind. *Elements*, 2011, vol. 7, pp. 313–319.
- Werdner G., Schreyer W. Experimental studies on borosilicates and selected borates. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*, 2002, vol. 33, pp. 117–163.
- Hinsberg V.J., Henry D.J.H.R., Marschall H.R. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *Can Mineral*, 2011, vol. 49, pp. 1–16.
- Roda-Robles E., Simmons W., Pesquera A., Gil-Crespo P.P., Nizamoff J., Torres-Ruiz J. Tourmaline as a petrogenetic monitor of the origin and evolution of the Berry-Havey pegmatite (Maine, U.S.A.). *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, pp. 95–109.
- Henry D., Novak M., Hawthorne F.C. Nomenclature of the tourmaline-super group minerals. *American Mineralogist*, 2011, vol. 96, pp. 895–913.
- Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim Cosmochim. Acta.*, 1999, vol. 63, no. 3, 4, pp. 49–71.
- Copjakova R., Škoda R., Galiova M.V., Novak M., Cempirek J. Scandium- and REE-rich tourmaline replaced by Sc-rich REE-bearing epidote-group mineral from the mixed (NYF+LCT) Kracovice pegmatite (Moldanubian Zone, Czech Republic). *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, pp. 1434–1451.
- Gusev A.I., Gusev N.I. Some aspects of geochemistry of minerals in Kumirskii scandium-uranium-rare earth elements deposit of Gorny Altai. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2014, no. 12, pp. 560–566. In Rus.
- Potceluev A.A., Rikhvanov L.P., Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Babrin D.I., Nikiforov A.Yu., Kotegov V.I. *Kalgutinskoe redkometalnoe mestorozhdenie (Gorniy Altai): magmatizm i rudogenez* [Kalgutinskoye rare-metal deposition (Gorny Altai); magmatism and ore genesis]. Tomsk, STT Publ., 2008. 226 p.
- Rollinson H.R. *Using geochemical data; evaluation, presentation*. Essex, London Group UK, 1994. 352 p.
- Zharikov V.A. Acidic-basic characteristics of minerals. *Geology of ore deposits*, 1967, no. 5, pp. 75–89.
- Helgeson H.C. Thermodynamic of hydrothermal system at elevated temperatures. *Amer. J. Sci.*, 1969, vol. 267, pp. 35–58.

20. Gusev A.I., Gusev N.I. Magmatism and ore mineralization of South-Kalgutinskii deposit of Gorny Altai. *Geologiya i mineralnaya resursa Sibiri*, 2016, no. 2 (26), pp. 110–120. In Rus.
21. Vinogradov A.P. Srednie sodержaniya khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh porod zemnoy kory [Average contents of chemical elements in basic type of igneous rocks of Earth crust]. *International Geochemistry*, 1962, no. 7, pp. 555–572.
22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, vol. 201, pp. 535–544.
23. Marakushev A.A. Termodinamicheskie faktory obrazovaniya rudnoy zonalnosti [Thermodynamic factors of forming ore zoning]. *Prognozirovaniye skrytogo orudneniya na osnove zonalnosti gidrotermal'nykh mestorozhdeniy* [Latent ore mineralization on the basis of zoning hydrothermal deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1976. pp. 36–51.
24. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1995, vol. 119, pp. 213–223.
25. Veksler I.V. Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: a summary of experimental studies. *Chem. Geol.*, 2004, vol. 210, pp. 7–31.
26. Novak M., Škoda R., Filip J., Macek J., Vaculovič T. Compositional trends in tourmaline from intragranitic NYF pegmatites of the Třebíč pluton, Czech Republic: an electron microprobe, Mössbauer and LA-ICP-MS study. *Can. Mineral.*, 2011, vol. 49, pp. 359–380.
27. Thomas R., Davidson P. Origin of miarolitic pegmatites in the Königshain granite Lusatia. *Lithos*, 2016, vol. 260, pp. 225–241.
28. Yang S.-Y., Jiang S.-Y., Zhao K.-D., Dai B.-Z., Yang T. Tourmaline as a recorder of magmatic–hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2015, vol. 170, pp. 42–56.

Received: 30 December 2017.

#### Information about the authors

Anatolij I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai Humane-Pedagogical University.