ТУРМАЛИН В ГРАНИТОИДАХ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев А.И.

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, Бийск, e-mail: anzerg@mail.ru

В статье приведены данные по химическому составу турмалинов пералюминиевых гранитоидов Горного Алтая. Турмалин относится к шерлу и образует рассеянную вкрапленность в породах и нодули. Выделены 2 группы гранитоидов: 1 – мусковит-турмалиновые лейкограниты с широкими возрастным интервалом от раннего девона до ранней юры и 2 – двуслюдяные лейкограниты с турмалином. Первые формировались за счёт частичного плавления турмалин-обогащённых гнейсов и кристаллизация турмалина не подчинялась заряд-радиус-контролируемому поведению химических элементов, а вторые являются более продвинутыми в отношении фракционирования в расплавах. Величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ Мтипа коррелируются с концентрациями вольфрама в турмалинах.

Ключевые слова: пералюминиевые лейкограниты, турмалин (шерл), частичное плавление турмалинобогащённых гнейсов, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М- типа

TOURMALINE IN GRANITOIDS OF MOUNTAIN ALTAI

Gusev A.I.

The Shukshin Altai State Humane-Pedagogical University, Biisk, e-mail: anzerg@mail. Ru

Data on chemical composition of tourmaline the peraluminous granitoids Mountain altai lead. Tourmaline treat to schorl and form disseminated insets in rocks and nodules. Two groups granitoids detached: 1 – muscovite-tourmaline leucogranites with wide age interval from Early Devonian to Early Jurassic and 2 – two-micas leucogranites with tourmaline. The first group formed for partial melting tourmaline-rich gneiss and crystallization of tourmaline did not submit to chard-radius-control behavior of chemical elements, but the second group appear more advanced in ratio of fractionation in melts. Sizes of tetradic effect fractionation of REE M-type correlated with concentrations of tungsten in tourmalines.

Keywords: peraluminous leucogranites, tourmaline (schorl), partial melting of tourmaline-rich gneiss, tetradic effect fractionation of REE M-type

Турмалин в гранитоидах Горного Алтая встречается не часто. Однако в значимых весовых количествах он отмечен в мусковит-турмалиновых лейкогранитах Чиндагатуйского, Орочаганского, двуслюдяных гранитах массивов Джулалю и Калгутинском, мусковиттурмалиновых лейкогранитах Тоштузекского массива, в мусковит-турмалиновых лейкогранитах Кумирского штока, Ак-Алахинского массива и апофизе Синюшинского массива на Колыванском медно-молибден-вольфрамовом месторождении. Во всех случаях появления турмалина в породах отмечается аномальные параметры флюидного режима и значительная активность таких летучих компонентов, как В, F, H,O, а также пространственная и парагенетическая связь этих образований и различных типов оруденения: W, Мо, Си, Sc, Au, редких земель. Считается, что граниты с относительно высокими концентрациями бора и магматическим турмалином появляются в типичных коллизионных зонах и, как правило, отвечают В-обогащённым источникам регионов [10]. Из сказанного следует актуальность изучения турмалиновых гранитоидов региона. Цель исследований изучение состава и особенностей геохимии и петрологии турмалиновых гранитоидов Горного Алтая.

Результаты исследования и их обсуждение

Описание и химический состав гранитоидов с турмалином Горного Алтая приведен во многих работах [3, 4]. Отличительной особенностью турмалин-содержащих гранитоидов является их пересыщенность глинозёмом (индекс Шенда ASI превышает 1,1). Все турмалин-содержащие интрузивы могут быть объединены в 2 группы: 1 – турмалинсодержащие двуслюдяные лейкограниты с ассоциацией минералов мусковит-биотиттурмалин-кварц-полевые шпаты (редко гранат) (интрузивы Джулалю, Калгутинский) и 2 – мусковит-турмалиновые лейкограниты с ассоциацией турмалин-мусковит-кварцполевые шпаты, иногда гранат (интрузивы Тоштузек, Чиндагатуй, Ак-Алахинский, апофиза Синюшинского массива, Кумирский шток). Возраст интрузий первой группе – раннеюрский, а второй – ранний девон, ранний триас, раннняя юра. В обоих группах турмалин встречается в виде тонкой вкрапленности (1,5 – 2,5 мм в поперечнике), нодулей размерами от 0,5 до 3 см в поперечнике. Кристаллы турмалина идиоморфны, гипидиоморфны. Отмечаются как зональные, так и не зональные индивиды.

628

■ GEOLOGO-MINERALOGICAL SCIENCES ■

Химический состав турмалинов (оксиды, F, B – в%, остальные элементы – в г/т)

| | 1 | 2 | 2 | 1 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| SiO | 41.5 | 41.3 | 41.2 | 30.0 | 38.3 | 35.8 | 35.0 | 36.2 |
| T:O | 41,5 | 41,5 | 41,2 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 0.2 | 0.4 |
| 1102 | 0,5 | 1,2 | 0,8 | 0,/ | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,4 |
| Al_2O_3 | 31,9 | 32,2 | 32,1 | 33,6 | 32,3 | 33,0 | 33,1 | 33,2 |
| Fe ₂ O ₃ | 19,3 | 15,1 | 18,9 | 14,2 | 14,0 | 10,1 | 9,95 | 9,98 |
| MnO | 0,12 | 0,4 | 0,7 | 0,1 | 0,13 | 0,05 | 0,5 | 0,45 |
| MgO | 1,25 | 2,2 | 1,2 | 2,3 | 2,1 | 4,4 | 4,6 | 4.55 |
| CaO | 0,66 | 0,63 | 1,1 | 0,2 | 0,1 | 0,4 | 0,7 | 0,7 |
| Na ₂ O | 2,1 | 1,9 | 0,9 | 1,6 | 1,2 | 1,9 | 2,0 | 0,8 |
| K,O | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,15 | 0,2 | 0,25 |
| F | 0,7 | 0,3 | 0,2 | 1,0 | 1,2 | 1,7 | 1,8 | 1,8 |
| В | 2,8 | 2,9 | 2,85 | 2,82 | 2,88 | 2,96 | 3,0 | 2,97 |
| V | 45,7 | 65,4 | 28,3 | 75,7 | 65,1 | 220,3 | 218,5 | 220,4 |
| Cr | 22,8 | 45,6 | 43,6 | 65,6 | 65,3 | 43,6 | 45,7 | 44,8 |
| Со | 8,7 | 11,5 | 4,7 | 16,3 | 13,1 | 4,9 | 5,6 | 5,2 |
| Ni | 7,9 | 12,6 | 18,5 | 25,6 | 15,6 | 23,7 | 26,6 | 24,9 |
| Cu | 1,7 | 2,6 | 12,3 | 3,8 | 4,8 | 243 | 232 | 225 |
| Zn | 23,7 | 12,8 | 16,1 | 72,6 | 62,1 | 628 | 616 | 632 |
| Rb | 31,6 | 30,5 | 44,9 | 24,7 | 24,0 | 90,2 | 86,3 | 87,5 |
| Sr | 146 | 142 | 229 | 125 | 145 | 176 | 185 | 191 |
| Nb | 4,1 | 4,2 | 9,8 | 4,6 | 4,8 | 1,2 | 1,4 | 1,3 |
| Cs | 0,66 | 0,64 | 8,54 | 0,65 | 0,69 | 2,4 | 2,6 | 2,5 |
| Ba | 76 | 65,8 | 875 | 61,6 | 65,2 | 89,4 | 90,7 | 91,4 |
| Pb | 7,1 | 6,2 | 45,2 | 5,6 | 7,6 | 45,1 | 44,3 | 46,8 |
| Th | 1,2 | 1,3 | 8,27 | 1,32 | 1,36 | 6,0 | 5,6 | 6,1 |
| La | 3,25 | 3,51 | 6,6 | 3,53 | 3,55 | 6,2 | 5,85 | 5,8 |
| Ce | 9,8 | 9,9 | 15,8 | 7,7 | 7,8 | 18,3 | 15,8 | 15,1 |
| Pr | 1,1 | 1,0 | 17,2 | 1,1 | 1,2 | 2,2 | 2,4 | 2,35 |
| Nd | 2,2 | 2,9 | 59,1 | 2,3 | 2,5 | 8,8 | 7,6 | 7,5 |
| Sm | 2,9 | 2,8 | 16,0 | 2, 5 | 2,7 | 1,25 | 1,23 | 1,21 |
| Eu | 0,66 | 0,9 | 0,35 | 0,85 | 0,65 | 0,37 | 0,34 | 0,35 |
| Gd | 2,7 | 2,8 | 4,75 | 2,66 | 2,69 | 1,05 | 0,98 | 0,95 |
| Tb | 0,52 | 0,52 | 0,58 | 0,54 | 0,56 | 0,15 | 0,16 | 0,17 |
| Dy | 4,8 | 3,7 | 3,01 | 3,65 | 3,8 | 7,8 | 7,7 | 6,8 |
| Но | 0,4 | 0,65 | 0,64 | 0,7 | 0,5 | 0,17 | 0,15 | 0,18 |
| Er | 1,3 | 2,1 | 2,2 | 2,0 | 1,4 | 0,63 | 0,64 | 0,66 |
| Tm | 0,3 | 0,33 | 0,48 | 0,35 | 0,32 | 0,11 | 0,12 | 0,13 |
| Yb | 3,7 | 2,7 | 4,16 | 3,97 | 2,7 | 1,2 | 1,15 | 1,18 |
| Lu | 0,32 | 0,39 | 0,97 | 0,32 | 0,34 | 0,27 | 0,29 | 0,28 |
| Y | 25,3 | 24,8 | 11,42 | 22,5 | 24,1 | 4,5 | 4,34 | 5,2 |
| Ga | 15,7 | 15,2 | 12,4 | 13,2 | 15,2 | 3,1 | 2,37 | 2,4 |
| Zr | 188 | 186 | 21,1 | 158 | 184 | 9,4 | 9,0 | 9,5 |
| Sc | 5,2 | 4,1 | 2,3 | 7,2 | 6,2 | 2,0 | 2,1 | 1,8 |
| Hf | 4,9 | 3,8 | 1,43 | 3,9 | 4,3 | 0,27 | 0,26 | 0,25 |
| Та | 0,7 | 0,42 | 3,4 | 0,4 | 0,5 | 11,2 | 11,16 | 11,8 |
| Мо | 11,2 | 11,1 | 22,5 | 13,7 | 18,2 | 45,8 | 44,5 | 43,6 |
| Sb | 4,7 | 3,2 | 4,9 | 4,8 | 4,9 | 5,2 | 4,8 | 4,5 |
| Sn | 101,4 | 66,6 | 129 | 96,8 | 106,4 | 131 | 128 | 129 |
| Be | 1,7 | 1,9 | 5,2 | 1,8 | 1,9 | 52,4 | 51,1 | 73,7 |
| W | 33,2 | 31,2 | 24,1 | 34,7 | 39,2 | 65,6 | 81,6 | 76,8 |
| U | 0,61 | 0,69 | 2,4 | 0,65 | 0,66 | 0,7 | 0,67 | 0,71 |
| Li | 56,9 | 46,7 | 98,4 | 66,7 | 86,9 | 99,6 | 98,6 | 96,7 |

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH № 3, 2016

| Окончание таблицы | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|--|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | | |
| Ge | 2,51 | 1,53 | 4,1 | 1,55 | 3,51 | 8,2 | 7,8 | 8,1 | | | | |
| Ag | 0,06 | 0,03 | 0,1 | 0,02 | 0,06 | 0,2 | 0,1 | 0,12 | | | | |
| Bi | 1,3 | 0,95 | 2,8 | 0,9 | 1,4 | 2,8 | 2,6 | 2,9 | | | | |
| Cd | 0,3 | 0,21 | 0,3 | 0,26 | 0,31 | 0,3 | 0,25 | 0,28 | | | | |
| ∑TR | 59,3 | 59,0 | 133,3 | 54,7 | 54,8 | 53,0 | 48,8 | 47,9 | | | | |
| TE ₁₃ | 1,7 | 1,26 | 1,0 | 1,29 | 1,41 | 2,01 | 2,23 | 2,06 | | | | |

Примечание. Анализы выполнены спектрально-силикатным методом для оксидов и лазерно-абляционным методом с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS и ICP-AES в Лаборатории ОИ МиГ СО РАН (г. Новосибирск). ∑ TR – сумма редкоземельных элементов. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами по [9]. Мусковиттурмалиновые лейкограниты: 1 – массива Чиндагатуй, 2 – Тоштузеского массива, 3 – апофизы Синюшинского массива Колыванского рудного поля, 4 – вкрапленность, 5 – нодули Кумирского штока; двуслюдяные лейкограниты с турмалином: 6 – массива Джулалю, 7 – Калгутинского массива (Калгутинское месторождение), 8 – Калгутинского массива (Южно-Калгутинское месторождение).



Рис. 1. Бинарные диаграммы (x^x/(x^x+Na) – Mg/Mg+Fe) (a) и Fe – Mg (б) в атомных количествах по [7] для турмалинов пералюминиевых гранитоидов Горного Алтая

Химический состав турмалинов представлен в таблице.

Согласно номенклатуре турмалинов анализируемые индивиды относятся к щелочным разностям по [7].

Параметр ξ^{x} представляет собой пропорцию вакансий элементов в X – положении. Расчёт структурных параметров турмалина осуществлялся на основании 15 катионной ячейки.

Турмалины пород отвечают номерам в таблице.

Все составы турмалинов на классификационных диаграммах попадают в поле шерлового турмалина и оксишерлового фоитита (рис. 1). Следует отметить, что турмалины первой группы раннеюрского возраста (Калгутиннские и Джулалю) по составу приближаются к границе дравитового ряда. Эта группа турмалинов отличается самыми низкими концентрациями суммы РЗЭ, Nb, Y, Zr, Hf, Ga и повышенными содержаниями Mg, F, W, Ge, Ag, V (таблица). В этой же группе турмалинов и проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (ТЭФ РЗЭ) М- типа с самыми высокими величинами.

Выводы

Выделенные две группы пералюминиевых гранитоидов различаются по многим параметрам. Различаются они и по соотношению некоторых элементов. Так по соотношению Y/Ho – Zr/Hf указанные группы занимают различную позицию относитель-

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 3, 2016 но подчинения заряд-радиус-контролируемого поведения химических элементов (рис. 2). Если турмалин мусковит-турмалиновых гранитоидов крситаллизовался при не соблюдении заряд-радиус-контролируемого поведения элементов, то турмалин двуслюдяных лейкогранитов с турмалином отвечал поведению элементов заряд-радиус-контролируемого (CHArge-and-Radius-Controlled) по [5].



Рис. 2. Диаграмма соотношений Y/Ho – Zr/Hf no [5] и для турмалинов пералюиниевых гранитоидов

Серым фоном на рисунках показано поле HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) по [5].

Условные обозначения под таблицей.

В связи с тем, что выделенные группы интрузий с турмалином отличаются различными парагенезисами сосуществующих минералов, то возникает вопрос о стабильности в отношении AFM (соотношение щёлочей, железа и магния) с разными фазами и влияния общего состава источника плавления и источника бора. Появление двуслюдяных и турмалиновых лейкогранитов может быть связано с различными причинами: 1 – мусковит-турмалиновые лейкограниты могут быть результатом фракционирования двуслюдяных лейкогранитов [14, 15]; 2 – два типа лейкогранитов могут быть результатом плавления различных фракций из одного и того же источника [6]: 3 – бимодальностью, отражающей различные протолиты, за счёт которых плавились двуслюдяные лейкограниты и мусковит-турмалиновые лейкограниты [8, 16]. Кроме того, существует мнение о том, что пералюминиевые составы турмалин-содержащих лейкогранитов характеризуются соотношением изотопов стронция (Sr > 0,710) [11, 13] и соотношением изотопов кислорода ($\delta^{18}O > + 10\%$), подтверждающие, что они были генерированы путём частичного плавления метаосадочных пород. Последнее положение подтверждается и нашими данными по Горному Алтаю. Текстурные характеристики и химические вариации подтверждают, что турмалин во всех случаях кристаллизовался в течение относительно ранней магматической стадии в субсолидусных условиях. Согласно данных [12], ассоциация биотит ± кордиерит и турмалин с мафическими фосфатными минералами (апатитом) могут кристаллизоваться в суперсолидусных условиях. Пералюминиевые двуслюдяные и мусковит-турмалиновые лейкограниты формировались в эпизональных условиях (при давлениях ~ 200–300 МРа) и температурах от 650 до 800 °C на основании определения температур насыщения циркона по геотермометру [18].



Рис. 3. Диаграмма W – TE_{1'3} для пералюминиевых лейкогранитов с турмалином (составлена автором)

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH № 3, 2016 Оценка потенциала лейкогранитов на вольфрам может быть осуществлена путём сравнения соотношений величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа и концентраций вольфрама. Известно, что проявление ТЭФ РЗЭ М-типа обусловлено высокой активностью и насыщенностью магматогенных флюидов фтор-комплексами, являющихся переносчиками металлов во флюидах [2]. На диаграмме соотношений W в турмалине и ТЭФ РЗЭ М-типа чётко видно, что увеличение значений ТЭФ РЗЭ сопровождается повышением концентраций вольфрама в турмалине (рис. 3).

ТЕ_{1'3} – тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов как среднее между первой и третьей тетрадами по [9]. Серая область на диаграмме выделена на основании средних содержаний вольфрама в изверженных породах по [1]. Содержания вольфрама в хондритах по [17].

Условные обозначения см. под таблицей.

В итоге можно заключить, что турмалин в пералюминиевых гранитоидах Горного Алтая относится к шерлу. Пералминиевые гранитоиды формировались при давлениях $\sim 200-300$ MPa и температурах от 650 до 800°С. Формирование пералюминиевых мусковит-турмалиновых лейкогранитов, для которых наблюдается значительная инкорпорация бора в расплав обеспечивалась частичным плавлением метаосадочных гнейсов, обогащённых турмалином. Кристаллизация такого турмалина не отвечало заряд-радиус-котролируемого поведения химических элементов. Менее обогащённые бором гранитные расплавы, в которых основную роль играл биотит, давали двуслюдяные лейкограниты с турмалином. Такие расплавы обычно генерируются путём частичного плавления и высокой степени фракционирования в расплавах и отвечало заряд-радиус-контролируемому поведению химических элементов. Потенциальная рудоносность гранитоидов определяется корреляцией концентраций вольфрама и величины ТЭФ РЗЭ М-типа. Более перспективны двуслюдяные лейкограниты с турмалином массивов Джулалю и Калгутинского.

Список литературы

1. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.

2. Гусев А.И., Гусев А.А. Тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов и его использование в решении проблем петрологии гранитоидов // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 5. – С. 45–49.

3. Гусев А.И. Магматизм и геолого-промышленные типы оруденения Колыванского рудного поля // Известия Бийского отделения русского географического общества, 2012. – Вып. 33. – С. 8–14.

4. Гусев А.И. Геохимия и петрология Чиндагатуйского массива юга Горного Алтая // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 11. – Ч. 3. – С. 27–32.

5. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/ Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contrib. Miner. Petrol. 1996. – V. 123. – P. 323–333.

6. Harris N., Inger S., Massey J. The role of fluids in the formation of High Himalayan leucogranites. In: Treloar P J, Searle M, editors. Himalayan Tectonics. // Geological Society, London, Special Publications, 1993. – Vol. 74. – P. 391–400.

7. Henry D., Novak M., Hawthorne F.C., et al. .Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist, 2011. – V. 96. – P. 895–913.

8. Guillot S., Le Fort P. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites // Lithos, 1995. – V. 35. – P. 221–234.

9. 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 Comochim Acta. 1999. – V. 63. – N_{2} 3/4. – P. 489–508.

10. Leeman W. P., Sisson V. B. Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes // Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy., 2002. – Vol. 33. – P. 645–707.

11. Linares E., Pellitero E., Saavedra J. Primeras edades radiométricas en el área estanno-wolframífera de Morille–Martinamor (Centro-Oeste de España) // Boletín Geológico y Minero, 1987. – V. XCVIII. – P. 640–646.

12. London D., Wolf M., Morgan G. B. VI., Gallego-Garrido M. Experimental silicate-phosphate equilibria in peraluminous granitic magmas, with a case study of the Alburquerque batholith at Tres Arroyos, Badajoz, España // Journal of Petrology, 1999. – V. 40. – P. 215–240.

13. Ramírez J. A. Estudio petrológico, geoquímico e isotópico del batolito de Jálama / Norte de Extremadura, 1996. – PhD thesis, Universidad de Granada. – P. 201.

14. Scaillet B., France-Lanord C., Le Fort P. Badrinath–Gangroti plutons (Garhwal, India): petrological and geochemical evidence for fractionation processes in a high Himalayan leucogranite // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1990. – V. 44. – P. 163–188.

15. Scaillet B., Pichavant M., Roux J. Experimental crystallization of leucogranite magmas // Journal of Petrology, 1995. – 36. – P. 663–705.

16. Visona D., Lombardo B. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest–Makalu region (Nepal–Tibet). Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating // Lithos, 2002. – V. 62. – P. 125–150.

17. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites // Phil. Trans. R. Soc. Lond, 1988. - V. 201. - P. 535-544.

18. WatsonE.B., Harrison T.M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in variety of crustal magma types // Earth and Planetary Science Letters, 1983. – V. 64. – P. 295–304.