

УДК552.3:550.4:550.42:550.93

ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ЩЕЛОЧНЫХ ГРАНИТОИДОВ ШИБЕЛИКСКОГО КОМПЛЕКСА 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 геохимии и петрологии щелочных гранитоидов шибеликского комплекса Горного Алтая. На основе представительных анализов пород и акцессорного циркона расшифровываются особенности генерации гранитоидов, их рудоносности и типизации. Гранитоиды отнесены к апаитовым сильно фракционированным разновидностям. В них и в цирконе проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа, обусловленный высокой насыщенностью фтор-обогащенными флюидами. Увеличение значений ТЭФ РЗЭ коррелируется с возрастанием кислотности среды. Выявляется экстремальная не когерентность отношений элементов к хондриту и несоответствие поведения заряд-радиусным характеристикам.

Ключевые слова: геохимия, петрология, щелочные апаитовые граниты, рибекит, циркон, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, не когерентность поведения элементов заряд-радиусным характеристикам

PETROLOGY AND GEOCHEMISTRY OF ALKALI GRANITOIDS OF SHIBELIKSKII COMPLEX MOUNTAIN ALTAI

Gusev A.I.

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

Data on geochemistry and petrology of alkali granitoids of Shibelikskii complex Mountain Altai lead in paper. Peculiarities of generation granitoids their ore mineralization and typezation decipher on representative analysis of rocks and zircon. Granitoids refer to apaitic strong fractionation differencies. The tetradic effect fractionation of REE M-type display in rocks and in zircon, causing by high saturation of fluor-rich fluids. Increasing of meanings TEF of REE correlated with increasing acidic of environment. The extrim non cogerence of ratio elements to hondrite and non conformity of behavior charge – and – radius-controlled characteristics.

Keywords: geochemistry, petrology, alkali apaitic granite, riebecite, zircon, tetradic effect fractionation of REE, non cogerence behavior of elements charge – and – radius-controlled characteristics

Щелочные гранитоиды имеют важное металлогеническое значение и являются показателями определённых геодинамических обстановок формирования. Шибеликские рибекитовые граниты образуют кучный кластер массивов в пределах рифтогенного прогиба, в пространственной связи с которыми связано цирконий-редкоземельное оруденение и комплексные аномалии Zr, TR и других металлов. Актуальность изучения этих гранитоидов не вызывает сомнений и определяется их главной рудогенерирующей ролью в формировании редкоземельного оруденения и циркония [2]. Цель исследования – осветить петрологические и геохимические особенности Шибеликских гранитоидов, осуществить их типизацию и определить перспективы рудоносности.

Результаты исследований и их обсуждение

Шибеликский щелочно-гранитовый гипабиссальный комплекс объединяет небольшие интрузивные тела щелочных гранитоидов позднедевонского возраста, развитых в центральной части Горного Алтая и вклю-

чает – петротипический Шибеликский, а также Куладинский и Шашикманский массивы. Все три массива локализованы в Куратинском прогибе, где прорываются отложения позднедевонской бичиктубомской и среднедевонской куратинской свит и контролируются Каирлык-Семинским сдвигом. В морфологическом отношении интрузивы представляют собой штокообразные тела с крутыми до субвертикальных (до 80–85°) контактами. Ширина контактовых ореолов не превышает десятков метров и наиболее значительна у Шибеликского интрузива: здесь вмещающие осадочные (глинистые сланцы) и вулканогенные (риолитоиды) породы бичиктубомской свиты неравномерно ороговикованы, в непосредственном контакте с гранитами местами превращены в кварц-биотит-альбитовые роговики.

В составе комплекса выделялось две интрузивные фазы с дополнительной дайковой серией: первая фаза – эгирин-рибекитовые граниты; вторая – рибекитовые лейкограниты; дайки эгирин-рибекитовых гранит-порфиров и микрогранитов. Породы комплекса во всех массивах петрографически однотипны и представлены в основном

мелко- и среднезернистыми обычно порфировидными гранитами с массивной, реже такситовой текстурой. Нередко отмечаются микропегматитовые и миароловые разновидности. Переходы между разными текстурными и структурными типами постепенные. Внешне породы имеют синевато-розовато- и желтовато-серую окраску, меняющиеся в зависимости от соотношения темноцветных и силикатных минералов. Под микроскопом устанавливаются гранитовая, гранофировая структуры. Минеральный состав: главные – кварц, калишпат-микрпертит, кислый плагиоклаз и рибекит; акцессорные – апатит, циркон, сфен, гранат, эпидот, ксенотим, монацит, ярозит, пирит, турмалин, шеелит, рутил, анатаз, магнетит, ильменит, флюорит, ортит. Содержания главных минералов варьируют в широких пределах. В порфировидных разновидностях они развиты как во вкрапленниках (размером до 0,5–1,0 см), так и в основной массе. В целом чаще преобладает микропертит (до 60%), в подчиненных количествах представлены кварц (до 30–35%), плагиоклаз (до 20%), рибекит (до 20%). Рибекит проявлен в виде скелетных обособлений (порфировидные выделения) и длиннопризматических и игольчатых кристаллов (основная масса), часто образуя шпировидные скопления. По своим оптическим свойствам (резкий плеохроизм от черного-синего по Np' до буровато-зеленовато-желтоватого по Ng' ; преломление по $Np = 1,687–1,690$, по $Ng = 1,697–1,700$) и химическому составу ($SiO_2 - 46,37\%$, $TiO_2 - 1,50$, $Al_2O_3 - 1,90$, $Fe_2O_3 - 20,04$, $FeO - 17,89$, $MnO - 0,99$, $MgO - 0,14$, $CaO - 2,88$, $Na_2O - 5,32$, $K_2O - 0,53$, $H_2O - 1,73$, $F - 0,56$) амфибол отнесен к ряду арфведсонит-рибекит. Пересчет на структурную формулу химического состава амфибола показал, что по величине катионной группы ($X = 2,01–2,1$) он близок к рибекиту (для рибекита $X = 2$, а для арфведсонита $X = 3$).

По содержаниям кремнезема породы первых двух массивов отвечают гранитам ($SiO_2 = 71,6–72,6\%$), а Шашикманского – лейкогранитам ($SiO_2 = 75,3\%$). Сумма щелочей в целом невысокая ($Na_2O + K_2O = 7,5–8,3\%$), но при низких содержаниях глинозема ($Al_2O_3 = 9,95–10,90\%$) коэффициент агпаитности близок или превышает единицу ($Ka_{gp} = 0,96–1,12$). По соотношению $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ составы шибеликских гранитов относятся к нормальным по щелочности пород, тяготея к границе с областью умеренно-щелочных производных. По соотношению щелочей ($Na_2O/K_2O = 0,8–1,1$) граниты относятся к калиево-натриевым, а по уров-

ню глиноземистости ($Al_2O_3 = 9,95–10,90$; индекс Шенда < 1) – к щелочным и переходным к метаглиноземистым. Для пород комплекса характерны высокие величины $FeO_{обш}/(FeO_{обш} + MgO) = 0,9–1,0$ и $Na_2O + K_2O - CaO = 6,8–8,1$, что соответствует железистым щелочным типам гранитоидов анорогенного типа.

В редкоэлементном составе шибеликских гранитов устанавливаются повышенные концентрации HFS-элементов, особенно Zr (1040–1740 г/т), Hf (25–43), Nb (93–160), Y (121–147), Ce (111–236), при относительно пониженных содержаниях LIL-элементов: Rb (82–160), Ba (17–68), Cs (< 1), Sr (9–24). На спайдеграмме резко выделяются глубокие Ba-, Sr-, P-, Ti-минимумы, что свойственно щелочным гранитоидам. В спектре редких земель при общем высоком уровне содержания TR (279–606 г/т) и слабодифференцированном профиле ($La_N/Yb_N = 0,92–3,8$) отмечается отчетливая отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = 0,21–0,27$), связанная, вероятно, с более ранним фракционированием плагиоклаза, учитывая обедненность пород Sr и Ba. Из других геохимических особенностей можно отметить весьма низкие концентрации фосфора ($P_2O_5 < 0,1\%$) и относительную обогащенность хромом (в основном 50–65 г/т), тяжёлыми редкими землями (Yb, Er).

В целом по петро-геохимическим показателям граниты шибеликского комплекса сопоставляются с типичными щелочными гранитоидами А-типа (гиперсолвусным и транссолвусным) и могут быть отнесены к агпаитовым редкометалльным гранитам или проявлениям щелочно-гранитовой формации. На дискриминационных диаграммах составы шибеликских гранитов размещаются в полях внутриплитных гранитоидов, что позволяет связывать формирование комплекса с рифтогенной обстановкой. Вместе с тем, по соотношениям Y-Nb-Ce породы тяготеют к анорогенным гранитам A_1 и A_2 .

В краевых частях Кулудинского и Шибеликского массивов отмечены фельдшпатоиды с прожилками кварца и вкрапленностью флюорита, циркона (малакона), монацита, ксеотима, синхизита и колумбита. Концентрации элементов в них составляют (%): циркония – от 0,1 до 1,4, гафния – от 0,05 до 0,3, ниобия – от 0,05 до 0,4, тантала – от 0,01 до 0,2, сумма TR – от 0,2 до 0,6%, Sc от 20 до 125 г/т. Оценены прогнозные ресурсы редких металлов для Шибеликского рудного узла в объёме (тыс. тонн): $\Sigma TR_2O_3 - 2647$, $ZrO_2 - 6435$, $HfO_2 - 269$, $Nb_2O_5 - 5493$, Ta_2O_5 .

Таблица 1

Представительные анализы пород шибеликского комплекса (оксиды в %, элементы в г/т)

	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	71,4	71,6	71,7	71,8	72,1	74,7	75,3	75,5
TiO ₂	0,5	0,47	0,48	0,49	0,45	0,21	0,2	0,15
Al ₂ O ₃	10,7	10,4	10,9	10,1	10,1	10,7	10,6	10,2
Fe ₂ O ₃	4,33	5,6	3,65	4,9	4,86	2,26	2,25	2,21
FeO	2,86	2,4	3,24	2,7	3,02	2,18	2,18	2,10
MnO	0,14	0,07	0,12	0,06	0,07	0,09	0,082	0,08
MgO	0,85	0,34	0,76	0,42	0,45	0,27	0,28	0,25
CaO	0,73	0,46	0,64	0,44	0,46	0,42	0,43	0,42
Na ₂ O	3,9	3,44	4,1	3,9	4,01	3,86	3,81	3,83
K ₂ O	3,61	4,12	3,7	4,4	4,32	4,05	4,07	4,03
P ₂ O ₅	0,03	0,02	0,02	0,05	0,06	0,02	0,025	0,02
ппп	0,55	0,6	0,29	0,45	0,1	0,21	0,25	0,2
Сумма	100	99,9	99,9	100	100	99,9	99,7	99,8
V	6,4	6,31	7,59	4,55	5,1	5,5	5,46	5,4
Cr	54,3	53,3	63,9	55,0	55,3	51,6	53,3	51,2
Co	6,1	6,66	6,28	6,6	6,4	4,2	4,01	4,0
Ni	12,3	15,1	21,7	6,9	7,3	8,0	8,99	8,04
Rb	82,3	116	92,8	140	140	155	160	150
Sr	21,3	19,2	21	8,9	9	15,7	16,3	15,1
Zr	1055	1557	1040	1713	1675	1608	1580	1595
Nb	110	121	103	124	123	97,8	93,5	96,3
Y	131	130	126	142	145	127	121	124
Ga	30,5	31,4	33,6	32,9	31,8	29,7	30,1	29,6
Cs	0,75	0,68	0,99	0,9	0,9	0,5	0,6	0,5
Ba	67,3	19,5	45,7	21,8	22,1	50,9	51,5	50,3
La	89,3	29,9	85,6	24,9	25,3	54	51	52
Ce	200,3	110	189	180	184	143	137	139
Pr	22,2	9,6	20,8	6,8	8,9	20,3	16,5	18,3
Nd	91,4	42,5	81,8	26,6	27,9	74,1	72,9	71,3
Sm	21,4	11,9	16,6	6,8	7,8	19,4	18,5	17,4
Eu	1,65	1,1	1,35	0,63	0,66	1,3	1,45	1,4
Gd	19,1	13,1	17,8	9,3	9,7	17,6	17,9	17,1
Tb	3,5	2,7	3,11	2,6	2,7	3,4	3,4	3,3
Dy	22,2	19,1	20,1	19,7	19,1	23	23	22
Ho	5,3	5,1	4,84	5,3	6,3	5,6	5,58	5,5
Er	14,1	14,0	13,5	15,1	15,4	15,0	15,3	15,1
Tm	2,1	2,3	1,95	2,6	2,6	2,4	2,55	2,5
Yb	16,3	17,1	15	16,8	18,2	18,8	19,8	18,4
Lu	2,2	2,3	2,16	2,45	2,5	2,6	2,69	2,6
Hf	26,9	35,8	25,6	40,2	42,3	43,0	43,1	43,2
Ta	6,4	8,3	6,24	8,5	8,7	7,3	7,31	7,32
Pb	14,1	20	13,2	22	22,4	22,2	23,9	22,4
Th	19,7	22,4	19	24,8	24,9	25,1	24,8	25,5
U	5,9	6,5	5,31	4,9	5,3	6,7	6,65	6,6
Sc	0,5	0,35	0,44	0,1	0,1	0,9	0,92	0,9
Li	32,1	24,5	14,3	16,7	7,1	41,8	40,5	41,3
K _{arr}	0,96	0,96	0,99	1,11	1,12	1,02	1,01	1,05
(La/Yb) _N	3,6	1,15	3,8	0,98	0,92	1,9	1,7	1,87

Примечание. Содержания элементов нормализованы по хондриту [6]. Породы шибеликского комплекса: 1–5 – граниты эгирин-рибекитовые, 6–8 – лейкограниты рибекитовые.

В некоторых породах комплекса проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа от 1,13 до 1,58 (значимые величины превышают 1,1). Следует отметить, что отношения элементов, приведенных в табл. 2, имеют различные отклонения от хондритовых. Отношения Y/No, La/Ta, La/Nb, Sr/Eu, Eu/Eu* значительно ниже хондритовых величин, а отношения Zr/Hf очень близки к хондритовым или превышают их. Это свидетельствует о значительной трансформации элементов в гранитоидах комплекса. Обращает на себя внимание негативная корреляция нормированных отношений $(La/Yb)_N$ и высоких величин тетрадного эффекта фракционирования М-типа. Последний проявлен чаще всего в высоко эволюционированных гранитных расплавах в связи с высокой насыщенностью магматогенных флюидов фтором [1].

На диаграмме соотношений Zr/Hf – $TE_{1,3}$ фигуративные точки составов пород показывают слабое увеличение отношений Zr/Hf с увеличением тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ (рис. 1).

Интерпретация результатов

Известно, что отношение циркония к гафнию является чувствительным индикатором фракционирования элементов в гранитоидах, и что увеличение отношений Zr/Hf происходит с увеличением кремнекислотности среды согласно ряду кислотности-щёлочности в водных и водно-сероводородных флюидах при стандартных условиях по [5]. Следовательно, увеличение величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа в породах позитивно коррелируется с увеличением кислотности среды.

Таблица 2

Величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ и отношения некоторых элементов в гранитоидах шибеликского комплекса

Отношения элементов и величины ТЭФ	1	2	3	4	5	6	7	8	Отношения в хондритах
Zr/Hf	39,2	43,5	40,6	42,6	39,6	37,4	36,6	36,9	36,0
Y/No	24,7	25,5	26,0	26,8	23,0	22,7	21,7	22,5	29,0
La/Nb	0,81	0,25	0,83	0,2	0,21	0,55	0,54	0,54	17,2
La/Ta	13,9	3,6	13,7	2,9	2,9	7,4	7,0	7,1	16,8
Sr/Eu	12,9	17,4	15,6	14,1	13,6	12,1	11,2	10,8	100,5
Eu/Eu*	0,25	0,27	0,24	0,24	0,23	0,21	0,2	0,25	1,0
$TE_{1,3}$	0,99	1,13	1,0	1,52	1,58	1,09	1,04	1,07	

Примечание. $TE_{1,3}$ – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами по [8]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N)/2$. Породы шибеликского комплекса: 1–5 – граниты эгирин-рибекитовые, 6–8 – лейкограниты рибекитовые.

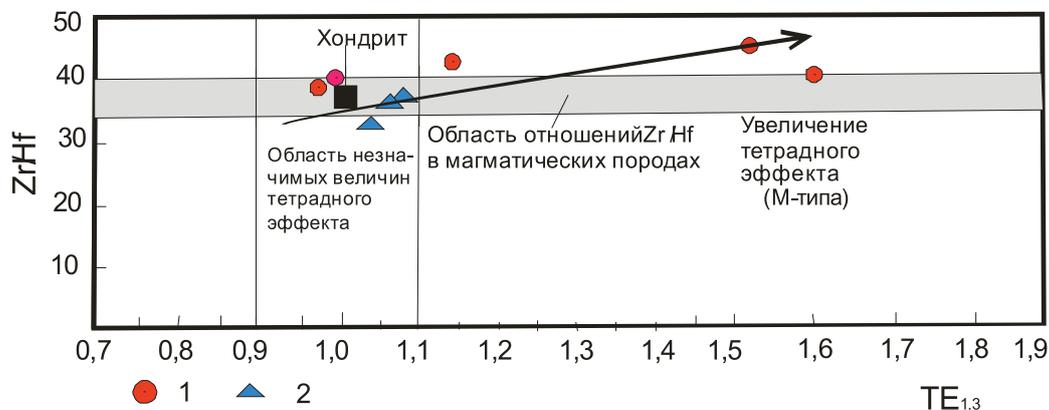


Рис. 1. Диаграмма соотношений Zr/Hf и $TE_{1,3}$ для пород шибеликского комплекса: 1 – эгирин-рибекитовые граниты; 2 – рибекитовые лейкограниты

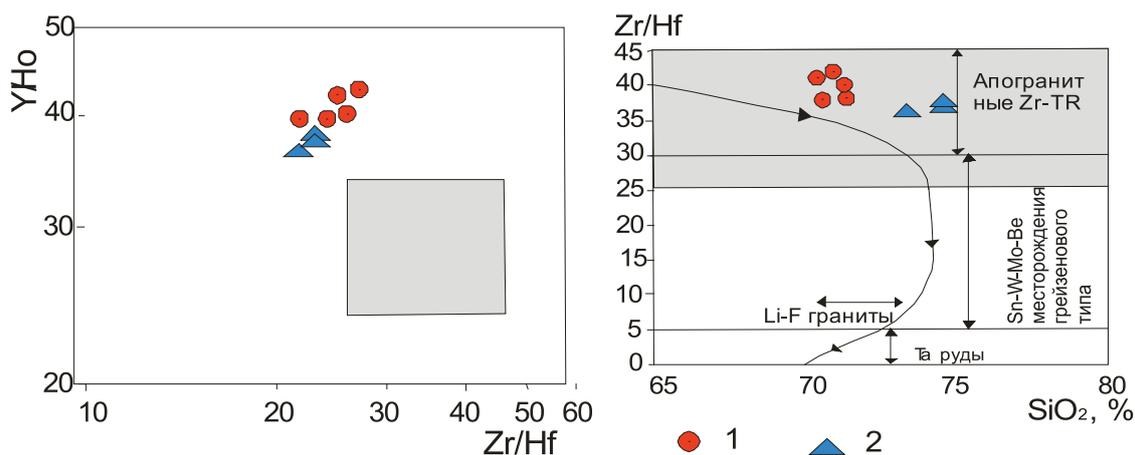


Рис. 2. Диаграммы соотношений Y/Ho – Zr/Hf по [7] и Zr/Hf – SiO₂ по [3, 4] для пород шибеликского комплекса

Серым фоном на рис. 2 показано поле HARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED) по [7]. На рис. б дугообразная линия со стрелками – кривая фракционирования расплавов редкометалльных гранитов и поля металлогенической специализации по [3, 4]; поле апогранитных цирконий-редкоземельных месторождений выделено автором по агпаитовым гранитоидам Центрально-Азиатского орогенного пояса.

По соотношениям Zr/Hf – SiO₂ породы шибеликского комплекса локализуются вблизи кривой фракционирования элементов в гранитоидах и располагаются в поле апогранитных цирконий-редкоземельных месторождений (рис. 2, б).

Соотношение Y/Ho – Zr/Hf показывает, что все анализы демонстрируют поведение типа «Non-HARAC» (CHARGE – and –

Radius-Controlled) [7], когда элементы с одинаковым ионным радиусом и зарядом (пары Y–Ho и Zr–Hf) экстремально не когерентны и не остаются вблизи хондритового отношения. Фигуративные точки составов пород выходят за пределы поля HARAC и дают эволюционный тренд в сторону уменьшения Zr/Hf от ранних фаз к поздней, что подтверждает их происхождение из магматической системы с влиянием внешнего F-обогащённого водного флюида, который характеризовался высокой фторонасыщенностью и образованием фтор-комплексов (рис. 2, а). Такие гранитоиды следует относить к высоко фракционированным гранитоидам. Представительные химические анализы основного акцессорного минерала – циркона сведены в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав цирконов
Шибеликского массива (оксиды – в масс. %, элементы – в г\т)

	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9
SiO ₂	33,3	33,5	33,2	33,3	33,3	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2
P ₂ O ₅	0,035	0,032	0,033	0,061	0,035	0,029	0,038	0,034	0,028	0,06
Sc	98	99	88	85	101	98	93	91	97	86
Y	503	418	440	394	483	560	543	582	550	395
Nb	2,45	2,6	2,02	1,91	2,6	2,58	2,75	3,6	2,94	1,95
La	0,02	0,061	0,09	0,158	0,049	0,047	0,234	0,065	0,02	0,158
Ce	41	34	40	32	39	34	36,8	48,1	39	32
Pr	0,067	0,05	0,064	0,103	0,084	0,048	0,124	0,084	0,052	0,103
Nd	1,2	0,8	1,4	1,0	1,0	1,3	1,17	1,45	1,1	1,0
Sm	2,04	1,63	1,95	1,57	2,09	2,04	1,6	2,1	2,11	1,57
Eu	0,78	0,75	0,71	0,69	0,8	0,66	0,83	1,04	0,8	0,69
Gd	10,4	8,5	9,4	8,4	10,1	10,7	10,9	11,1	10,9	8,4
Tb	3,16	2,58	2,75	2,58	2,91	3,13	3,28	3,6	3,22	2,58

Окончание табл. 3

	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9
Dy	39,7	32	36,2	32,0	38,4	43,6	43,0	44,5	43,2	32,0
Ho	15,6	12,4	13,8	12,4	14,6	17,3	17,0	17,4	16,8	12,4
Er	80,8	62,1	68,2	62,1	74,8	87,9	86,6	92,3	88,1	62,1
Tm	19,0	15,1	16,2	15,1	18,3	23,4	21,5	22,1	21,1	15,1
Yb	198	154	170	154	189	242	228	232	228	154
Lu	43,8	32,1	34,6	32,1	41,3	51,3	48,6	51	49,8	32,1
Hf	8450	9370	8710	9370	9040	9090	8512	9055	9250	9360
Ta	0,88	0,72	0,78	0,72	0,87	0,96	1,03	1,05	0,95	0,71
Pb	9,0	7,9	9,7	7,9	10,6	6,6	9,21	11,6	8,4	7,7
Th	192	176	225	176	241	162	190	237	193	175
U	313	316	315	316	398	300	350	369	360	315
Th/U	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6
TE _{1,3}	8,0	4,6	3,6	3,7	6,5	4,1	3,4	5,1	7,3	3,7

Циркон отличается высокими концентрациями Hf, Y, Sc и тяжёлых РЗЭ. В нём проявлен также ТЭФ РЗЭ М- типа, но аномально высоких значений, варьирующих от 3,4 до 8. Известно, что циркон относится к группе минералов селективного концентратора суммы скандиевых TR (Er, Yb, Lu), что и подтверждается нашими данными по аксессуарам Шибеликской группе интрузивов.

Выводы

1. Гранитоиды шибеликского комплекса относятся к агпаитовому типу сильно фракционированному, испытавшему приток флюидов, обогащённых фтором.

2. В них проявлены ТЭФ РЗЭ М-типа и отсутствие заряд-радиус контролируемого поведения химических элементов.

Список литературы

1. 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.

2. Гусев А.И., Гусев Н.И. Анорогенные гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим. – Бийск: Изд-во АГАО, 2014. – 202 с.

3. Гусев А.И. Агпаитовые редкометалльные гранитоиды Алтая и их рудоносность // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 11 (часть 1). – С. 76–80.

4. Зарайский Г.П., Аксюк А.М., Девятова В.Н. Цирконий-гафниевый индикатор фракционирования редкометалльных гранитов // Петрология. – 2009. – № 1. – С. 28–50.

5. Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.

6. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1989. – Vol. 53. – P. 197–214.

7. 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. – Vol. 123. – P. 323–333.

8. 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. – № 3/4. – P. 489–508.