

УДК 552.3:550.4:550.42:550.93

## ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И РУДОНОСНОСТЬ АНОРОГЕННЫХ ГРАНИТОИДОВ ШИБЕЛИКСКОГО КОМПЛЕКСА 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 изучения петрологии, геохимии и оруденения анорогенных гранитоидов шибеликского комплекса Горного Алтая, который представлен сильно фракционированными разновидностями. С ними пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения Zr, Nb, Ta и TR.

**Цель исследования:** изучить петрологические, геохимические особенности пород, акцессорного циркона и оруденения Шибеликского ареала с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности магматогенного и гидротермального цирконов.

**Методы** исследований включали изучение зональных и незональных кристаллов сфена и апатита с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «ОПТИМА-4300» с высокой чувствительностью определения элементов в Лаборатории Объединённого института геологии и геофизики Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск). Определение элементов-примесей в цирконах выполнено методом LA-ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и с лазерной абляцией) на масс-спектрометре ELEMENT 2 (фирма Thermo Finnigan Mat) с лазерной приставкой UP-2B, Nd: YAG (фирма New Wave Research) в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

**Результаты.** В статье приведены данные по геохимии и петрологии щелочных гранитоидов, магматического и гидротермального циркона шибеликского комплекса Горного Алтая. На основе представительных анализов пород и акцессорного циркона расшифровываются особенности генерации гранитоидов, их рудоносности и типизации. Гранитоиды отнесены к агапитовым сильно фракционированным разновидностям. В них и в цирконе проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) P3Э M-типа, обусловленный высокой насыщенностью фтор-обогащёнными флюидами. Увеличение значений ТЭФ P3Э коррелируется с возрастанием кислотности среды. Выявляется экстремальная некогерентность отношений элементов к хондриту и несоответствие поведения заряд-радиусным характеристикам. Магматогенный циркон характеризуется призматической и пирамидальной формой кристаллов и высокими концентрациями Hf, Y, Sc и тяжёлых P3Э. Гидротермальный циркон имеет более высокие концентрации Nb, Ta и суммы TR.

### Ключевые слова:

Геохимия, петрология, щелочные агапитовые граниты, рибекит, циркон, тетрадный эффект фракционирования P3Э, некогерентность поведения элементов заряд-радиусным характеристикам.

### Введение

Щелочные гранитоиды имеют важное металлогеническое значение и являются показателями определённых геодинамических обстановок формирования [1]. Шибеликские рибекитовые граниты образуют кучный кластер массивов в пределах рифтогенного прогиба Горного Алтая, в пространственной связи с которыми связано цирконий-редкоземельное оруденение и комплексные аномалии Zr, TR и других металлов. В последнее время наряду с изучением общего состава пород для выяснения петрогенезиса используют редкоземельные элементы, Zr, Nb, Y, Be, Th, U и другие несовместимые элементы [2–4], а также состав акцессорных минералов, позволяющих расшифровать многие стороны образования горных пород и выяснить их потенциальную перспективность на различные типы оруденения [5, 6]. В нашем исследовании мы обратили внимание на магматогенный и гидротермальный циркон в парагенетической связи с щелочными гранитоидами Шибеликского ареала. Установлено, что генетическая связь между магматогенным и гидротермальным цирконом может обеспечить эволюцию магматогенных флюидов и гидротермальных процессов в формировании ред-

кометалльных месторождений [7, 8]. Актуальность изучения этих гранитоидов не вызывает сомнений и определяется их главной рудогенерирующей ролью в формировании редкоземельного оруденения и циркония [9–11].

### Результаты исследований

Шибеликский щелочно-гранитовый гипабиссальный комплекс объединяет небольшие интрузивные тела щелочных гранитоидов позднедевонского возраста, развитых в центральной части Горного Алтая, и включает петротипический Шибеликский, а также Куладинский и Шашикманский массивы. Все три массива локализованы в Куратинском прогибе, где прорывают 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 неравно-

мерно ороговикованы, в непосредственном контакте с гранитами местами превращены в кварц-биотит-альбитовые роговики.

В составе комплекса выделялись две интрузивные фазы с дополнительной дайковой серией: первая фаза – эгирин-рибекитовые граниты; вторая – рибекитовые лейкограниты; дайки эгирин-рибекитовых гранит-порфириров 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, меняющуюся в зависимости от соотношения темноцветных и салических минералов. Под микроскопом устанавливаются гранитовая, гранофировая структуры. Минеральный состав: главные – кварц, калишпат-микрпертит, кислый плагиоклаз и рибекит; аксессуарные – апатит, циркон, сфен, гранат, эпидот, ксенотим, монацит, ярозит, пирит, турмалин, шеелит, рутил, анатаз, магнетит, ильменит, флюорит, ортит.

Магматогенные цирконы в эгирин-рибекитовых гранитах плоские, изометричные, часто лепешковидные, около 40 % – субидиоморфные, близкие пирамидальным и призматическим формам, отвечающими по морфологии высокотемпературным цирконам щелочных магм [12, 13]. Цвет белый, прозрачный, желтоватый, розоватый до красно-бурого и коричневого. В отдельных зёрнах проявлена типичная осцилляционная зональность, характерная для магматогенных цирконов. 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 длинно-призматических и игольчатых кристаллов (основная масса), часто образуя шпировидные скопления. По своим оптическим свойствам (резкий плеохроизм от черно-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. Пересчёт 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  $X=3$ ).

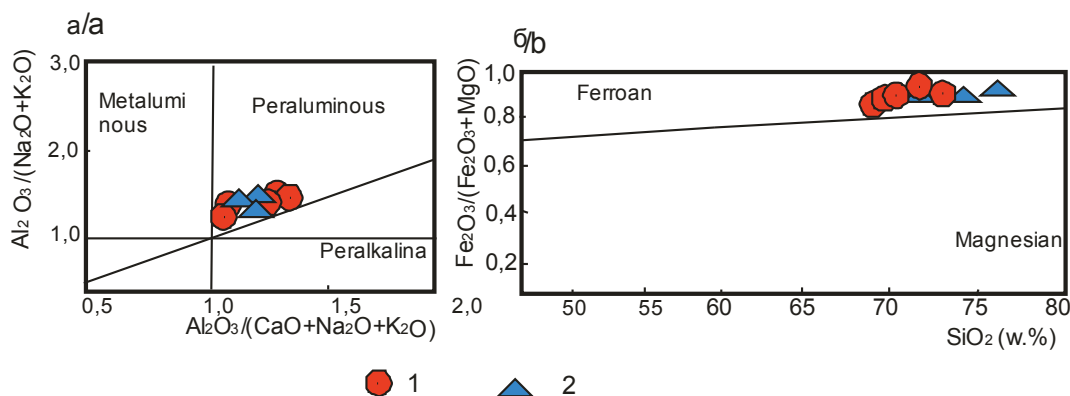
Лейкограниты отличаются преобладанием кварца и микроклин-пертита, отсутствием темноцветного минерала или присутствием редких выделений рибекита. По этим характеристикам они приближаются по составу к субсолвусным микрогранитам.

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 ( $K_{анн}=0,96...1,12$ ). По соотношению  $SiO_2$  – ( $Na_2O+K_2O$ ) составы шибеликских гранитов относятся к нормальным по щелочности породам, 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 уровню глиноземистости ( $Al_2O_3=9,95...10,90$ ; индекс Шенда  $< 1$ ) – к щелочным и переходным к металиноземистым. Для пород комплекса характерны высокие величины  $FeO_{общ}/(FeO_{общ}+MgO)=0,9...1,0$  и  $Na_2O+K_2O-CaO=6,8...8,1$ , что соответствует железистым щелочным типам гранитоидов анорогенного типа. В них повышены концентрации галлия, что также свойственно анорогенным гранитоидам.

В Горном Алтае анорогенный гранитоиды выделялись ранее Н.Н. Амшинским, В.А. Домаренко, Л.П. Рихвановым, А.Г. Владимировым и другими. Породы шибеликского комплекса в открытой печати характеризуются нами впервые. Возраст шибеликского комплекса, согласно обновленной серийной легенде, определяется как поздний карбон – ранняя пермь и основывается на радиологической датировке (301 млн лет) по цирконам (SHRIMP-II, Лаборатория ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург) из гранитов Шибеликского массива.

На канонических диаграммах породы шибеликского комплекса попадают в поля пералюминиевых и железистых разностей (рис. 1).

В редкоэлементном составе шибеликских гранитов устанавливаются повышенные концентрации HFS-элементов, особенно Zr (1040...1740 г/т), Hf (25...43 г/т), Nb (93...160 г/т), Y (121...147 г/т), Ce (111...236 г/т), при относительно пониженных содержаниях LIL-элементов: Rb (82...160), Ba (17...68), Cs ( $< 1$ ), Sr (9...24). Резко выделяются глубокие Ba-, Sr-, P-, Ti-минимумы, что свойственно щелочным гранитоидам. В спектре редких земель при общем высоком уровне содержаний TR (279...606 г/т) и слабодифференцированном профиле ( $La_N/Yb_N=0,92...3,8$ ) отмечается отчетливая отрицательная Eu-аномалия ( $Eu/Eu^*=0,23...0,4$ ), связанная, вероятно, с более ранним фракционированием плагиоклаза, учитывая бедность 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 51...64 г/т), тяжёлыми редкими землями (Yb, Er).



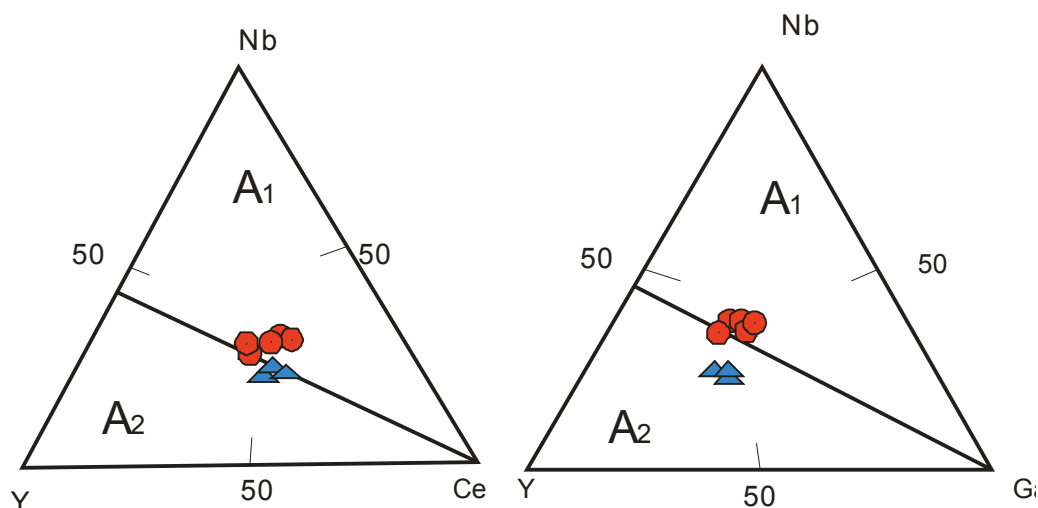
**Рис. 1.** Классификационные диаграммы: а)  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)-Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$  по [14]; б)  $SiO_2-Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)$  по [15] для пород шибеликского комплекса. Породы комплекса: 1 – эгирин-рибекитовые граниты; 2 – рибекитовые лейкограниты

**Fig. 1.** Classification plots: а)  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)-Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$  after [14]; б)  $SiO_2-Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)$  after [15] for rocks of Shibelikskii complex. Rocks of the complex: 1 are the aegirine-riebeckite granites; 2 are the riebeckite leucogranites

В целом по петрогеохимическим показателям граниты шибеликского комплекса сопоставляются с типичными щелочными гранитоидами А-типа (гиперсольвусным и трансольвусным) и могут быть отнесены к агапайтовым 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 и Y-Nb-Ga породы тяготеют к анорогенным гранитам  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 2).

В краевых частях Кулудинского и Шибеликского массивов отмечены фельдшпатоиды с про-

жилками кварца и вкрапленностью флюорита, циркона, монацита, ксеотима, синхизита и колумбита. В отличие от магматогенного циркона, гидротермальный имеет дипирамидальный облик, как правило, эвгедральный с хорошо развитыми гранями {111}, близкими к синтетическим кристаллам и гидротермальным цирконам [18, 19]. Концентрации элементов в метасоматитах 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 объеме (тыс. тонн):  $\Sigma TR_2O_3 - 2647$ ,  $ZrO_2 - 6435$ ,  $HfO_2 - 269$ ,  $Nb_2O_5 - 5493$ ,  $Ta_2O_5 - 1876$ .



**Рис. 2.** Диаграммы Y-Nb-Ce и Y-Nb-Ga по [16, 17] для гранитоидов Шибеликского ареала. Поля гранитоидов по [16, 17]:  $A_1$  – анорогенные гранитоиды  $A_1$ -типа мантийных горячих точек и плюмов;  $A_2$  – анорогенные гранитоиды  $A_2$ -типа постколлизийных обстановок. Условные обозначения – те же, что на рис. 1

**Fig. 2.** Plot Y-Nb-Ce and Y-Nb-Ga after [16, 17] for granitoids of Shibelikskii areal. Fields of granitoids are after [16, 17]:  $A_1$  are the anorogenic granitoids of  $A_1$ -type of mantle hot spots and plums;  $A_2$  are the anorogenic granitoids of  $A_2$ -type of postcollisional settings. The legend is the same as in Fig. 1

**Таблица 1.** Представительные анализы пород шибеликского комплекса (оксиды в %, элементы в г/т)

**Table 1.** Representative analysis of rocks of Shibelikskii complex (oxides are in wt. %, elements are in g/t)

Компоненты Components								
SiO <sub>2</sub>	71,4	71,6	71,7	71,8	72,1	74,7	75,3	75,5
TiO <sub>2</sub>	0,5	0,47	0,48	0,49	0,45	0,21	0,2	0,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,7	10,4	10,9	10,1	10,1	10,7	10,6	10,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	3,9	3,44	4,1	3,9	4,01	3,86	3,81	3,83
K <sub>2</sub> O	3,61	4,12	3,7	4,4	4,32	4,05	4,07	4,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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
Σ	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 <sub>эпн</sub> /K <sub>агр</sub>	0,96	0,96	0,99	1,11	1,12	1,02	1,01	1,05
(La/Yb) <sub>N</sub>	3,6	1,15	3,8	0,98	0,92	1,9	1,7	1,87
Eu/Eu*	0,4	0,27	0,24	0,24	0,23	0,31	0,24	0,25

Примечание. Содержания элементов нормализованы по хондриту [20]. Породы шибеликского комплекса: 1–5 – граниты эгирин-рибекитовые, 6–8 – лейкограниты рибекитовые.

Note. Contents of elements are normalized by chondrite [20]. The rocks of Shibelikskii complex: 1–5 are the aegirine-riebeckite granites; 6–8 are the riebeckite leucogranites.

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)<sub>N</sub> 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 и другими летучими компонентами [21].

**Таблица 2.** Величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ и отношения некоторых элементов в гранитоидах шибеликского комплекса

**Table 2.** Quantities of tetrad effect of REE fractionation and ratios of some elements in granitoids of Shibelikskii complex

Отношения элементов и величины ТЭФ Ratio of elements and TEF value									Отношения в хондритах Ratio in chondrites
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 <sub>1,3</sub>	0,99	1,13	1,0	1,52	1,58	1,09	1,04	1,07	–

Примечание. TE<sub>1,3</sub> – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами по [22]. Eu\*=(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>)/2. Породы шибеликского комплекса: 1–5 – граниты эгирин-рибекитовые, 6–8 – лейкограниты рибекитовые.

Note. TE<sub>1,3</sub> is the tetrad effect of REE fractionation as a mean of the first and third tetrads after [22]. Eu\*=(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>)/2. The rocks of Shibelikskii complex: 1–5 are the aegirine-riebeckite granites; 6–8 are the riebeckite leucogranites.

На диаграмме Zr/Hf – TE<sub>1,3</sub> фигуративные точки составов пород показывают слабое увеличение отношений Zr/Hf с увеличением тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа, свидетельствуя о значительной роли флюидного режима и летучих компонентов в рудоносности гранитоидов (главного циркониевого оруденения) (рис. 3).

Парагенетически с гранитоидами связан предполагаемый геолого-промышленный тип оруденения – цирконий-ниобий-иттриевоземельных щелочных гранитов. Оруденение приурочено к краевым частям массивов и связано с проявлением фельдшпатолитов. Оруденение выявляется по литогеохимическому опробованию, минералы-носители РЗЭ (бастнезит, паризит, синхизит, монацит,

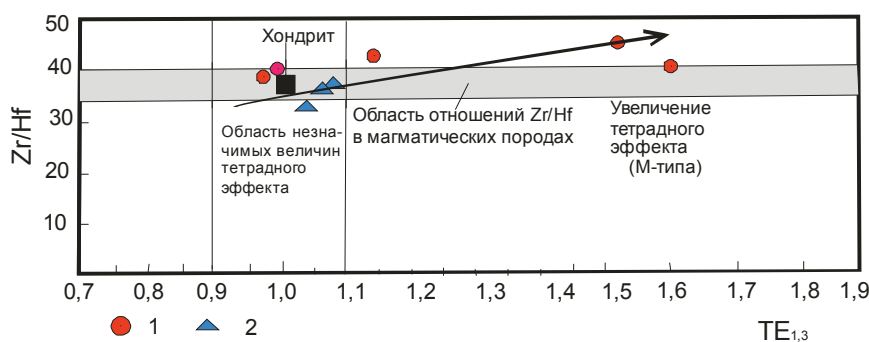


Рис. 3. Диаграмма Zr/Hf и  $TE_{1,3}$  для пород шибеликского комплекса. Остальные условные обозначения – те же, что на рис. 1

Fig. 3. Plot of ratio of Zr/Hf and  $TE_{1,3}$  for rocks of Shibelikskii complex. The legend is the same as in Fig. 1

ортит, ксенотим) установлены при минералогическом изучении проб-протокочек. Главный околорудный поисковый признак – метасоматический. Он заключается в локализации руд в калишпатизированных, биотитизированных породах с наложенным рибекитом (щелочной автоматоматоз). Прямыми поисковыми признаками являются присутствие проявлений и пунктов минерализации редкоземельных элементов и циркония. Косвенные поисковые признаки: широкое развитие метасоматической проработки пород (рибекитизация, калишпатизация, биотитизация); потоки рассеяния рудных элементов (Zr, Y, Yb) и элементов-спутников (Sn, Be), что сближает их с альбитизированными и грейзенизированными гранитами (апогранитами) по [23]. На рудопроявлениях среди метасоматитов установлены циркон, тантало-ниобаты, синхизит, монацит, ортит, ксенотим, редко – бастнезит, паризит. Концентрации рудных компонентов составляют (г/т): циркония – 1450–1980, ниобия – 100–150,  $\Sigma TR$  – 650–1250, Au – 0,4–0,8. На основе комплекса признаков выделен прогнозируемый Шибеликский рудный узел, для которого по аналогии с Улуг-Танзекским рудным узлом (Тува) оценены прогнозные ресурсы:  $\Sigma TR_2O_3$  – 60 тыс. т,  $ZrO_2$  – 350 тыс. т.

Приведенные данные показывают, что гранитоиды шибеликского комплекса характеризуются ярко выраженной радиогеохимической специализацией (табл. 1). Это подтверждается повышенными содержаниями в породах тория и отношениями Th/U. Особенно высокие указанные значения фиксируются в цирконах. Такие показатели указывают на возможное обнаружение и уранового оруденения в пространственной и парагенетической связи с гранитоидами шибеликского комплекса. Сопоставление проявления аналогичных по составу щелочных гранитоидов других регионов, согласно сводке по [24], не противоречит такому заключению.

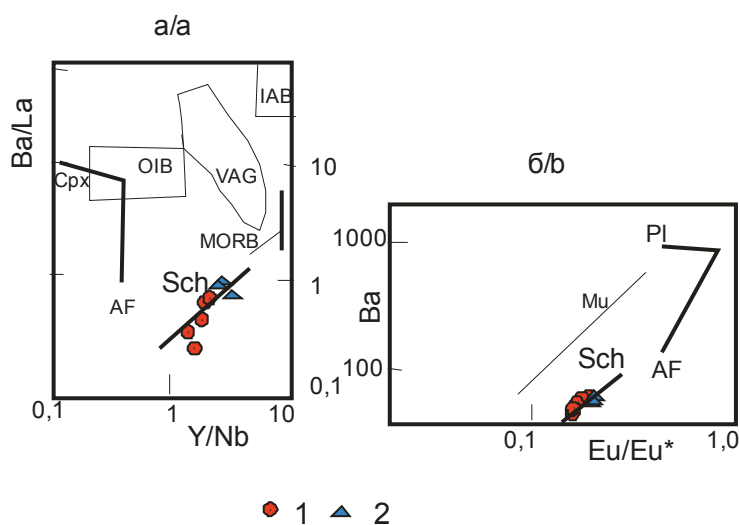
#### Интерпретация результатов

Рибекитовые граниты с пертитовым щелочным полевым шпатом Шибеликского массива яв-

ляются гиперсольвусными моношпатовыми гранитами, а в заключительных фазах Шашикманского массива, представленных существенно лейкогранитами слабо умеренно-щелочными, не содержат щелочных темноцветных минералов. В ходе эволюции магматизма Шибеликского ареала химизм пород менялся существенно, что, вероятно, связано с процессами фракционирования минералов в глубинном очаге. Для проверки последнего тезиса построены диаграммы, позволяющие наглядно представить ход процесса кристаллизационной дифференциации путём фракционирования (рис. 4). На указанных диаграммах прослеживаются тренды фракционирования минералов при ведущей роли щелочного полевого шпата. При этом характер тренда фракционирования минералов и элементов пород Шибеликского ареала почти параллелен тренду щелочного полевого шпата и тренду фракционирования, отмеченному в аналогичных рибекитовых гранитах комплекса Мумбула (Австралия) позднедевонского возраста [16, 17]. Следовательно, генезис гранитоидов Шибеликского ареала связан с процессами фракционирования щелочных полевых шпатов в глубинном очаге.

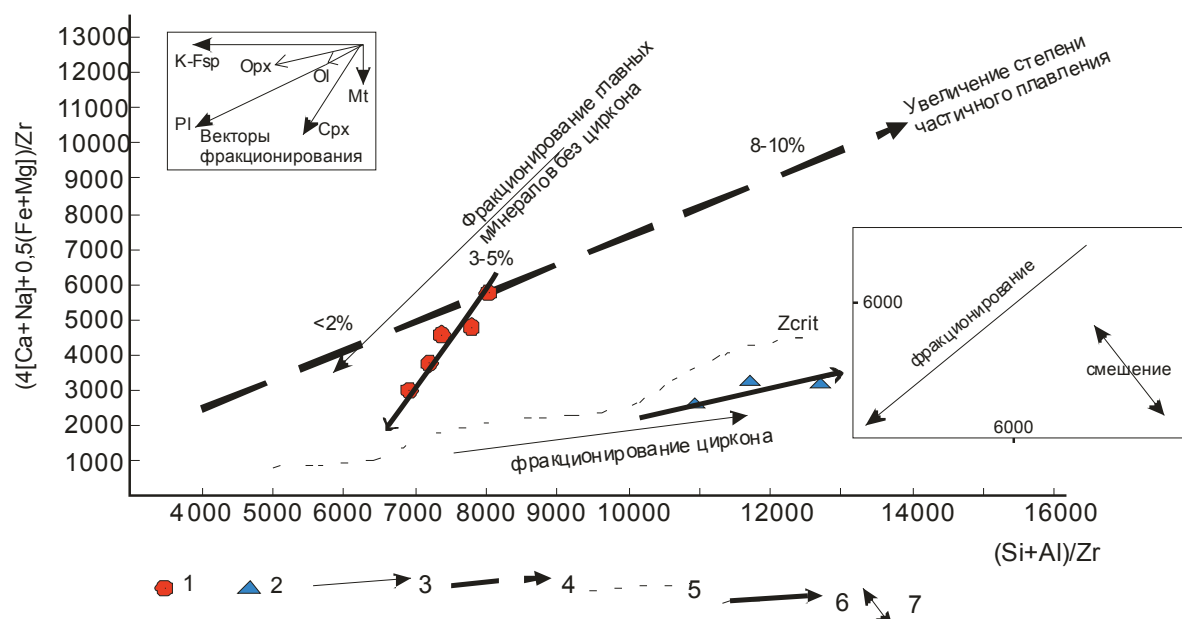
Вероятно, сильное фракционирование минералов приводило к значительным изменениям в соотношениях химических элементов, что отразилось на соотношениях в породах таких элементов, как Y, Nb, Ce, Ga. На рис. 2 видно, что самые фракционированные разности – лейкограниты Шашикманского массива – попадают в другое поле по геодинамической обстановке формирования ( $A_2$ -тип гранитов).

Характер фракционирования различных минералов просматривается на экспериментальной диаграмме по [26]. На диаграмме составы пород распадаются на 2 кластера фигуративных точек. Составы эгирин-рибекитовых гранитов отвечают небольшой степени частичного плавления (3...5 %) и фракционирования главных породообразующих минералов без циркона. Лейкограниты выстраиваются параллельно тренду фракционирования циркона (рис. 5).



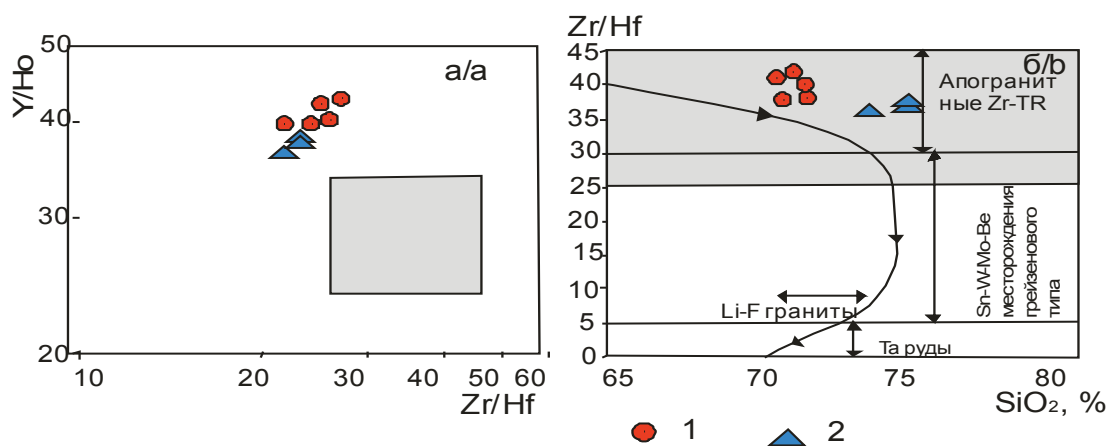
**Рис. 4.** Тренды фракционирования минералов в расплавах для гранитоидов шибеликского комплекса: а – в координатах Ba/La–Y/Nb; б – в координатах Ba (г/т) –Eu/Eu\* по Дж. Эби [16, 17]. Тренды фракционирования приведены согласно коэффициентам разделения в расплавах по [23]: Срх – клинопироксена, AF – щелочного полевого шлата, Pl – плагиоклаза. Поля составов: IAB – островодужные базальты; VAG – гранитоиды вулканических дуг; OIB – базальты океанических островов; MORB – базальты океанического дна. Тренды фракционирования: Mu – анорогенных гранитоидов комплекса Мумбула (Австралия); Sc – гранитоидов Шибеликского ареала

**Fig. 4.** Trends of minerals fractionation in melts for Shibelikii complex: a – in coordinates Ba/La–Y/Nb; b – in coordinates Ba (g/t)–Eu/Eu\* after [16, 17]. Trends of fractionation are given according to the partition coefficients in melts after [23]: Cpx – clinopyroxene, AF – alkali feldspar, Pl – plagioclase. Fields of compositions: IAB – island arc basalts; VAG – granitoids of volcanic arcs; OIB – oceanic island basalts; MORB – basalts of ocean floor. Trends of fractionation: Mu – anorogenic granitoids of the Mumbula complex (Australia); Sh – granitoids of Shibelikii areal. The legend is the same as in Fig. 1



**Рис. 5.** Диаграмма молекулярных отношений  $(4[Ca+Na]+0,5[Fe+Mg])/Zr-(Si+Al)/Zr$  по Т. Брэдшоу [26] для интрузивных пород Шибеликского ареала. Породы Шибеликского ареала: 1 – эгирин-рибекитовые граниты; 2 – лейкограниты; 3 – эволюционные тренды фракционирования минералов; 4 – тренд увеличения степени частичного плавления; 5 – критическая линия раздела фракционирования главных минералов и циркона (при 68 % SiO<sub>2</sub>); 6 – частные эволюционные тренды интрузивных пород Шибеликского ареала; 7 – тренды смещения расплавов

**Fig. 5.** Plot of molecular ratio  $(4[Ca+Na]+0,5[Fe+Mg])/Zr-(Si+Al)/Zr$  after [26] for intrusive rocks of Shibelikii areal. The rocks of Shibelikii areal: 1 are the aegirine-riebeckite granites; 2 are the riebeckite leucogranites; 3 are the evolution trends of minerals fractionation; 4 is the trend of increasing the degree of partial melting; 5 is the critical line of division of fractionation of the main minerals and zircon (for 68 % SiO<sub>2</sub>); 6 are the particular evolution trends of intrusive rocks of Shibelikii areal; 7 are the trends of melts mixing. The legend is the same as in Fig. 1



**Рис. 6.** Диаграммы соотношений Y/Ho–Zr/Hf по [28] и Zr/Hf–SiO<sub>2</sub> по [29, 30] для пород шибеликского комплекса. Серым фоном на рисунках а и б показано поле HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) по [28]. На рис. б дугообразная линия со стрелками – кривая фракционирования расплавов редкометалльных гранитов и поля металлогенической специализации по [29, 30]; поле апогранитных цирконий-редкоземельных месторождений выделено автором по апаитовым гранитоидам Центрально-Азиатского орогенного пояса. Остальные условные обозначения – те же, что на рис. 1

**Fig 6.** Plots of ratios Y/Ho–Zr/Hf after [28] and Zr/Hf–SiO<sub>2</sub> after [29, 30] for rocks of Shibelikskii complex. The gray background shows the field HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) after [28]. In fig. b the arcuate line with arrows indicates the curve of fractionation of rare metal granitoids melts and the fields of metallogenetic specialization after [29, 30]; the field of apogranitic zirconium-rare earth elements deposits is detached by the author by the apaitic granitoids of Central-Asian orogenic belt. The legend is the same as in Fig. 1

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 рядам кислотности-щёлочности в водных и водно-сероводородных флюидах при стандартных условиях по [27]. Следовательно, увеличение величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа в породах позитивно коррелируется с увеличением кислотности среды.

По соотношениям Zr/Hf–SiO<sub>2</sub> породы шибеликского комплекса локализуются вблизи кривой фракционирования элементов в гранитоидах и располагаются в поле, характерном для апогранитных цирконий-редкоземельных месторождений (рис. 6, б).

Соотношение Y/Ho–Zr/Hf показывает, что все анализы демонстрируют поведение типа Non-HARAC (CHArge – and – Radius-Controlled) [28], когда элементы с одинаковым ионным радиусом и зарядом (пары Y–Ho и Zr–Hf) экстремально не когерентны и не остаются вблизи хондритовых отношений.

Известно, что CHARAC-поведение относится к элементам со сходными и близкими зарядами и радиусами, которые определяют когерентное поведение и имеют постоянные хондритовые отношения и сглаженные хондрит-нормализованные модели редкоземельных элементов относительно ионного радиуса и атомного числа [28]. Non-CHARAC-поведение элементов встречается, главным образом, в высокоэволюционированных магматических си-

стемах, которые обогащены H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и летучими компонентами, такими как Li, B, F и/или Cl, в течение перехода от силикатного расплава к водным флюидам или от магматической к гидротермальной системам [31]. Non-CHARAC-поведение химических элементов часто сопровождается лантанидным тетрадным эффектом фракционирования РЗЭ, результатом сегментированных моделей РЗЭ одновременно в породах и слагающих их минералах. Обе эти особенности отражаются и в цирконе из высокодифференцированных гранитных магм, которые испытывают интенсивные гидротермальные взаимодействия или дейтерические (автопневматолитические) изменения [1, 32, 33]. Они проявляются в высокоэволюционированных лейкогранитах, пегматитах и редкометалльных минерализованных гранитах [34–38].

Фигуративные точки составов пород Шибеликского ареала выходят за пределы поля CHARAC 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 фторнасыщенностью и образованием фтор-комплексов (рис. 6, а). Такие гранитоиды следует относить к высокофракционированным.

Представительные химические анализы основного акцессорного минерала – магматогенного циркона – сведены в табл. 3.

Магматогенный циркон отличается высокими концентрациями Hf, Y, Sc и тяжёлых РЗЭ. Магматогенный циркон имеет интенсивную позитивную

аномалию по церию и негативную – по европию. 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) [37], что и подтверждается нашими данными по аксессуариям Шибеликской группы интрузивов.

**Таблица 3.** Химический состав магматогенных цирконов Шибеликского массива (оксиды – в мас. %, элементы – в г\т)

**Table 3.** Chemical composition of magmatogen zircons of Shibelikskii massif (oxides are in wt. %, elements are in g/t)

SiO <sub>2</sub>	33,3	33,5	33,2	33,3	33,3	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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
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 <sub>1,3</sub>	8,0	4,6	3,6	3,7	6,5	4,1	3,4	5,1	7,3	3,7

Химический состав гидротермального циркона отражён в табл. 4.

Гидротермальный циркон отличается от магматогенного значительно меньшими концентрациями Sc, Y, но более высокими содержаниями Nb, Ta. В нём существенно большие концентрации суммы редких земель. В гидротермальных цирконах величины ТЭФ РЗЭ М-типа меньше, чем в магматогенных, варьирующие от 1,83 до 3. Следует отметить, что близкие результаты по составам магматогенных и гидротермальных цирконов получены для массива Берже в Китае [39].

Палеогеодинамическая обстановка формирования анорогенных гранитоидов шибеликского комплекса связана с внутриплитным этапом развития региона. Внутриплитный этап выделяется с момента затухания коллизионных процессов (предположительно от границы карбон – пермь) и охва-

тывает интервал времени до квартера включительно. С ранней стадией данного этапа (поздний карбон – ранний триас) и связано формирование щелочно-гранитовой (шибеликский комплекс) формации. Предполагается, что этот магматический эпизод проходил под влиянием и, вероятно, с участием мантийных диапиров, рассматриваемых в настоящее время как проявление позднепалеозойско-раннемезозойского пика активности долгоживущих Таримского и Сибирского суперплюмов. Возрастная датировка гранитоидов (301 млн лет) ближе к функционированию Таримского плюма [40].

**Таблица 4.** Химический состав гидротермальных цирконов Шибеликского массива (оксиды – в мас. %, элементы – в г\т)

**Table 4.** Chemical composition of hydrothermal zircons of Shibelikskii massif (oxides are in wt. %, elements are in g/t)

SiO <sub>2</sub>	32,4	33,5	33,2	33,3	33,3	33,2	33,2	33,3	33,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,031	0,03	0,032	0,051	0,033	0,028	0,036	0,031	0,027
Sc	58	59	48	55	71	58	53	61	57
Y	53	48	44	34	43	46	43	42	45
Nb	32,4	32,6	22,2	31,9	52,6	42,8	42,7	53,6	92,9
La	30,0	40,0	55,9	50,8	65,04	54,07	43,2	70,6	55,02
Ce	341	434	540	632	639	534	436,8	548,1	539
Pr	67	56	64	103	84	48	91	84	52
Nd	121,2	234,8	111,4	109,0	108,0	107,3	103,1	145	117
Sm	32,04	51,63	41,95	61,57	52,09	62,04	61,6	72,1	62,11
Eu	0,68	0,71	0,7	0,89	0,83	0,56	0,81	1,24	0,89
Gd	50,4	48,5	49,4	58,4	90,1	103,7	104,9	211,1	140,9
Tb	33,16	42,58	52,75	42,58	52,91	43,13	53,28	53,6	63,22
Dy	439,7	432	336,2	322,0	238,4	243,6	343,0	444,5	343,2
Ho	115,6	212,4	213,8	212,4	214,6	217,3	127,0	317,4	216,8
Er	380,8	462,1	368,2	262,1	374,8	387,9	386,6	492,3	488,1
Tm	109,0	105,1	126,2	135,1	128,3	213,4	211,5	222,1	221,1
Yb	498	354	470	354	289	242	328	332	328
Lu	143,8	132,1	134,6	132,1	141,3	151,3	148,6	151	109,8
Hf	84	93	87	91	90	92	85	95	92
Ta	388	272	278	172	187	196	103	105	195
Pb	29,0	37,9	92,7	57,9	60,6	56,6	59,2	41,6	83,4
Th	192	176	225	176	241	162	190	237	193
U	413	416	415	365	385	306	354	349	363
Th/U	0,46	0,42	0,54	0,48	0,63	0,53	0,54	0,68	0,53
TE <sub>1,3</sub>	2,63	1,87	2,37	3,0	2,4	1,86	2,75	1,83	1,92

## Заключение

1. Гранитоиды шибеликского комплекса относятся к агпаитовому типу сильно фракционированному, испытавшему приток флюидов, обогащённых фтором и другими летучими компонентами. По геохимическим признакам это анорогенные гранитоиды А<sub>2</sub>- и А<sub>1</sub>-типов. Они классифицируются пералюминиевым и железистым типом гранитоидов и могут быть отнесены к редкометалльно-редкоземельным гранитам с апогранитным цирконий-редкоземельным оруденением.



- Петрогенезис гранитоидов Шибеликского ареала связан на раннем этапе с небольшой степенью частичного плавления мантийного субстрата, последующим фракционированием главных породообразующих минералов, а на заключительной стадии при формировании лейкогранитов – с фракционированием циркона.
- В породных типах комплекса проявлены ТЭФ РЗЭ М-типа и неподчинение заряд-радиус-контролируемого поведения химических элемен-

тов, определяющихся высоководным флюидом, насыщенным летучими компонентами.

- Цирконы магматогенного этапа отличаются от гидротермальных цирконов значительно меньшими количествами скандия, иттрия. В то же время в них отмечены высокие концентрации ниобия, тантала и сумма редких земель.
- В магматогенных и гидротермальных цирконах также проявлен ТЭФ РЗЭ М-типа, но в аномально высоких значениях – от 1,83 до 8,0.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ветрин В.Р. Длительность формирования и источники вещества гранитоидов Липцо-Арагубского комплекса, Кольский полуостров // Геохимия. – 2014. – № 1. – С. 38–51.
- Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks / I.V. Veksler, A.M. Dorfman, M. Kamenetsky, P. Dulski, D.B. Dingwell // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2005. – V. 69. – P. 2847–2860.
- Zircon solubility in alkaline aqueous fluids at upper crustal conditions / J.C. Ayers, L. Zhang, Y. Luo, T. Peters // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2012. – V. 96. – P. 18–28.
- Andersen T., Friis H. The Transition from Aegirite to Hyperaegirite Magmatic Crystallization in the Ilmaussaq Alkaline Complex, South Greenland // *J. Petrology.* – 2015. – V. 56. – P. 1343–1364.
- Hoskin P.W.O. Trace element composition of the hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2005. – V. 69. – P. 637–648.
- Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: a case study from the Gidginbirnie high-sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, SE Australia / B. Fu, T.P. Mernagh, N.T. Kita, A.I.S. Kemp, J.W. Valley // *Chem. Geol.* – 2009. – V. 259. – P. 131–142.
- Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized mole granite (NSW, Australia). P. II: evolving zircon and thorite trace element chemistry / T. Pettke, A. Audetat, U. Schaltegger, C.A. Heinrich // *Chem. Geol.* – 2005. – V. 220. – P. 191–213.
- Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized mole granite (NSW, Australia). P. I: crystallization of zircon and REE-phosphates over three million years – a geochemical and U-Pb geochronological study / U. Schaltegger, T. Pettke, A. Audetat, E. Reusser, C.A. Heinrich // *Chem. Geol.* – 2005. – V. 220. – P. 215–235.
- Гусев А.И., Гусев Н.И. Анорогенные гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим. – Бийск: Изд-во АГАО, 2014. – 202 с.
- Phosphorus-controlled trace element distribution in zircon revealed by NanoSIMS / W. Yang, Y. Lin, J. Hao, J. Zhang, S. Hu, H. Ni // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 2016. – V. 171. – P. 28–44.
- Редкометалльные гранитоиды (месторождение Неудачное, Полярный Урал) / О.В. Удодатина, В.А. Андреев, В.А. Капитанова, А.И. Ларионов // *Отечественная геология.* – 2015. – № 4. – С. 9–14.
- Atlas of zircon textures / F. Corfu, J.M. Hanchar, P.W.O., Hoskin, P. Kinny // *Rev. Mineral. Geochem.* – 2003. – V. 53. – P. 469–500.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: example from Eastern Australian granitoids // *Journal Petrol.* – 2006. – V. 47. – P. 329–353.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Soc. America Bulletin.* – 1989. – V. 101. – P. 635–643.
- Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // *Trans. of Royal Soc. of Edinburgh Earth Science.* – 1998. – V. 89. – P. 113–119.
- Eby G.N. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis // *Lithos.* – 1990. – V. 26. – P. 115–134.
- Eby G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // *Geology.* – 1992. – V. 20. – P. 641–644.
- McNaughton N.J., Mueller A.G., Groves D.I. The age of the giant Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia: ion-microprobe zircon and monazite U-Pb geochronology of a synmineralization lamprophyre dike // *Econ. Geol.* – 2005. – V. 100. – P. 1427–1440.
- Schaltegger U. Hydrothermal zircon // *Elements.* – 2007. – V. 3. – P. 51–68.
- Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
- 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.
- 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. 489–508.
- Беус А.А. Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты). – М: Изд-во «Академия наук СССР», 1962. – 193 с.
- Ножкин А.Д., Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в коллизионных и внутриплитных натрий-калиевых гранитоидах: уровни накопления, значение для металлогении // *Геохимия.* – 2014. – № 9. – С. 807–809.
- Henderson P. *Inorganic Geochemistry.* – Oxford: Pergamon, 1982. – 312 p.
- Bradshaw T.K. The adaptation of Pearce element ratio diagrams to complex high silica systems // *Contrib. Mineral. Petrology.* – 1992. – V. 109. – P. 450–458.
- Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.
- 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.

29. Гусев А.И. Агпайтовые редкометалльные гранитоиды Алтая и их рудоносность // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 11 (часть 1). – С. 76–80.
30. Зарайский Г.П., Аксюк А.М., Девятова В.Н. Цирконий-гафниевый индикатор фракционирования редкометалльных гранитов // Петрология. – 2009. – № 1. – С. 28–50.
31. 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.
32. Akagi T., Shabani M.B., Masuda A. Lanthanide tetrad effect in kimuraite  $(\text{CaY}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$  – implication for a new geochemical index // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1993. – V. 57. – P. 2899–2905.
33. Bau M. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: experimental evidence for Ce oxidation, Y-Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1999. – V. 63. – P. 67–77.
34. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: a method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits / T. Monecke, U. Kempe, J. Monecke, M. Sala, D. Wolf // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2002. – V. 66. – № 7. – P. 1185–1196.
35. W- and M-type tetrad effects in REE patterns for water-rock systems in the Tono uranium deposit. Central Japan / Y. Takahashi, H. Yoshida, N. Sato, K. Hama, Y. Yusa, H. Shimizu // Chem. Geol. – 2002. – V. 184. – P. 311–335.
36. Van Lichtervelde M., Melcher F., Wirth R. Magmatic vs. hydrothermal origins for zircon associated with tantalum mineralization in the Tanco pegmatite, Manitoba // Am. Mineral. – 2009. – V. 94. – P. 439–450.
37. Geochemical evolution and late re-equilibration of Na-Cs-rich beryl from the Koktokay #3 pegmatite (Altai, NW China) / R.C. Wang, Z.D. Che, W.L. Zhang, A.C. Zhang, H. Zhang // Eur. J. Miner. – 2009. – V. 21. – P. 795–809.
38. Минеев Д.А. Лантаноиды в минералах. – М.: Недра, 1969. – 184 с.
39. Geochemistry of magmatic and hydrothermal zircon from the highly evolved Baerzhe alkaline granite: implications for Zr-REE-Nb mineralization / W.-B. Yang, H.-C. Niu, Q. Shan, W.-D. Sun, H. Zhang, N.-B. Li, Yu-H. Jiang, X.-Y. Yu // Miner. Deposita. – 2014. – V. 49. – Iss. 4. – P. 451–470.
40. Термохронологическая модель пермо-триасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений / Н.Л. Добрецов, А.С. Борисенко, А.Э. Изох, С.М. Жмодик // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51 (9). – С. 1159–1187.

Поступила 23.04.2016 г.

#### Информация об авторах

**Гусев А.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры географии и экологии естественно-географического факультета Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

## PETROLOGY, GEOCHEMISTRY AND ORE MINERALIZATION OF ANOROGENIC GRANITOIDS OF SHIBELIKSKII COMPLEX IN GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev,  
anzerg@mail.ru

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

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need of researching petrology, geochemistry and ore mineralization of anorogenic granitoids of Shibelikskii complex which is represented by strong fractionated rocks. Different types of ore mineralization of Zr, Nb, Ta and REE are related to such rocks spatially and paragenetically.

**The main aim** of the research is to study petrology, geochemical features of rocks, accessory mineral zircon and ore mineralization of Shibelikskii areal using the experimental diagrams, which allow revealing the genetic problems and determining physico-chemical features of magmatic and hydrothermal zircon crystals.

**The methods used in the study.** 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 OIGaG SO RAN (Novosibirsk). Chemical elements in zircon were determined by La-ISP-MS mass-spectrometry method with inductively coupled plasma and laser ablation on the mass-spectrometer ELEMENT 2 (Thermo Finnigan Mat) with laser device UP-2B, Nd: YAG (New Wave Research) in the Laboratory OIGaG SO RAN (Novosibirsk).

**Results.** The paper introduces the data on geochemistry and petrology of alkali granitoids and accessory magmatic and hydrothermal zircon of Shibelikskii complex in Gorny Altai. Based on the representative analysis of rocks and zircon the features of granitoids generation, their ore mineralization and typification are determined. The granitoids refer to agpaitic strong fractionation rocks. The tetradic effect of REE M-type fractionation appears in the rocks and in zircon. It is caused by high saturation with fluoro-rich fluids. Increase in meanings of tetradic effect of REE is correlated with the growth of the environment acidity. The author has determined the extreme non-coherence of elements ratio to chondrite and non-conformity of behavior to charge-and-radius-controlled characteristics. Magmatic zircon is characterized by prismatic and pyramid crystal form and high contents of Hf, Y, Sc, and heavy REE. Hydrothermal zircon has higher contents of Nb, Ta and sum of REE.

### Key words:

Geochemistry, petrology, alkali agpaitic granite, riebeckite, zircon, tetradic effect of REE fractionation, non-coherence of elements behavior to charge and radius-controlled characteristics.

### REFERENCES

- Vetrin V.R. Dlitel'nost formirovaniya i istochniki veshchestva granitoidov Litsko-Aragubskogo kompleksa, Kolskii poluostrov [Duration of formation and sources of the granitoids of the Litsko-Araguba Complex, Kola Peninsula]. *Geochemistry International*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 38–51.
- Veksler I.V., Dorfman A.M., Kamenetsky M., Dulski P., Dingwell D.B. Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, vol. 69, pp. 2847–2860.
- Ayers J.C., Zhang L., Luo Y., Peters T. Zircon solubility in alkaline aqueous fluids at upper crustal conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2012, vol. 96, pp. 18–28.
- Andersen T., Friis H. The Transition from Agpaitic to Hyperagpaitic Magmatic Crystallization in the Ilimaussaq Alkaline Complex, South Greenland. *J. Petrology*, 2015, vol. 56, pp. 1343–1364.
- Hoskin P.W.O. Trace element composition of the hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, vol. 69, pp. 637–648.
- Fu B., Mernagh T.P., Kita N.T., Kemp A.I.S., Valley J.W. Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: a case study from the Gidginbing high-sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, SE Australia. *Chem. Geol.*, 2009, vol. 259, pp. 131–142.
- Pettke T., Audetat A., Schaltegger U., Heinrich C.A. Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized mole granite (NSW, Australia). P. II: evolving zircon and thorite trace element chemistry. *Chem Geol.*, 2005, vol. 220, pp. 191–213.
- Schaltegger U., Pettke T., Audetat A., Reusser E., Heinrich C.A. Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized mole granite (NSW, Australia). P. I: crystallization of zircon and REE-phosphates over three million years – a geochemical and U-Pb geochronological study. *Chem. Geol.*, 2005, vol. 220, pp. 215–235.
- Gusev A.I., Gusev N.I. *Anorogennyye granitoidy: petrologiya, geokhimiya, fluidnyy rezhim* [Anorogenic granitoids: petrology, geochemistry, fluid regime]. Biysk, ASAE Publ., 2014. 202 p.
- Yang W., Lin Y., Hao J., Zhang J., Hu S., Ni H. Phosphorus-controlled trace element distribution in zircon revealed by NanoSIMS. *Contrib. Mineral Petrol.*, 2016, vol. 171, pp. 28–44.
- Udoratina O.V., Andreichev V.A., Kapitonov V.A., Larionov A.I. Rare metals granitoids (Neudachnoe deposit, Polar Ural. *Otechestvennaya geologiya*, 2015, no. 4, pp. 9–14. In Rus.
- Corfu F., Hancher J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P. Atlas of zircon textures. *Rev. Mineral Geochem.*, 2003, vol. 53, pp. 469–500.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: example from Eastern Australian granitoids. *Journal Petrol.*, 2006, vol. 47, pp. 329–353.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Soc. America Bulletin*, 1989, vol. 101, pp. 635–643.
- Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science*, 1998, vol. 89, pp. 113–119.
- Eby G.N. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 1990, vol. 26, pp. 115–134.

17. Eby G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 1992, vol. 20, pp. 641–644.
18. McNaughton N.J., Mueller A.G., Groves D.I. The age of the giant Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia: ion-microprobe zircon and monazite U-Pb geochronology of a synmineralization lamprophyre dike. *Econ. Geol.*, 2005, vol. 100, pp. 1427–1440.
19. Schaltegger U. Hydrothermal zircon. *Elements*, 2007, vol. 3, pp. 51–68.
20. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.
21. Gusev A.I., Gusev A.A. Tetradnyy efekt fraktsionirovaniya redkozemelnykh elementov i ego ispolzovanie v reshenii problem petrologii granitoidov [Tetradic effect of rare earth elements fractionation and its use in solving the problems of granitoids petrology]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2011, no. 5, pp. 45–49.
22. 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. 489–508.
23. Beus A.A. *Albitizirovannye i greizenizirovannye granity (apogranity)* [Albitized and greisenized granites]. Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 1962. 193 p.
24. Nozhkin A.D., Rikhvanov L.P. Radioaktivnye element v kolliziionnykh i vnutripitnykh natriy-kalievyykh granitoidakh: urovni nakopleniya, znachenie dlya metallogenii [Radioactive elements in collisional and within-plate Sodic-Potassic Granitoids: accumulation levels and metallogenic significance]. *Geochemistry International*, 2014, vol. 52, no. 9, pp. 807–826.
25. Henderson P. *Inorganic Geochemistry*. Oxford, Pergamon, 1982. 312 p.
26. Bradshaw T.K. The adaptation of Pearce element ratio diagrams to complex high silica systems. *Contrib. Mineral. Petrology*, 1992, vol. 109, pp. 450–458.
27. Marakushev A.A. *Termodinamicheskie factory obrazovaniya rudnoy zonalnosti skrytogo orudneniya na osnove zonalnosti gidrotermalnykh mestorozhdeniy* [Thermodynamic factors of forming ore zoning latent ore mineralization on the basis of zoning hydrothermal deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1976. pp. 36–51.
28. 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, pp. 323–333.
29. Gusev A.I. Agpaitic rare metal granitoids of Altai and their ore mineralization. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2015, no. 11 (P. 1), pp. 76–80. In Rus.
30. Zarayskiy G.P., Aksyuk A.M., Devyatova V.N. Tsirkoniy-gafnievy indikator fraktsionirovaniya redkometallnykh granitov [Zr/Hf ratio as a fractionation indicator of rare-metal granites]. *Petrology*, 2009, vol. 17, no. 1, pp. 28–50.
31. 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.
32. Akagi T., Shabani M.B., Masuda A. Lanthanide tetrad effect in kimuraite  $\{CaY_2(CO_3)_4 \cdot 6H_2O\}$  – implication for a new geochemical index. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1993, vol. 57, pp. 2899–2905.
33. Bau M. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: experimental evidence for Ce oxidation, Y-Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, vol. 63, pp. 67–77.
34. Monecke T., Kempe U., Monecke J., Sala M., Wolf D. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, vol. 66, no. 7, pp. 1185–1196.
35. Takahashi Y., Yoshida H., Sato N., Hama K., Yusa Y., Shimizu H. W- and M-type tetrad effects in REE patterns for water-rock systems in the Tono uranium deposit, Central Japan. *Chem. Geol.*, 2002, vol. 184, pp. 311–335.
36. Van Lichtervelde M., Melcher F., Wirth R. Magmatic vs. hydrothermal origins for zircon associated with tantalum mineralization in the Tanco pegmatite, Manitoba. *Am. Mineral*, 2009, vol. 94, pp. 439–450.
37. Wang R.C., Che Z.D., Zhang W.L., Zhang A.C., Zhang H. Geochemical evolution and late re-equilibration of Na-Cs-rich beryl from the Koktokay #3 pegmatite (Altai, NW China). *Eur. J. Miner.*, 2009, vol. 21, pp. 795–809.
38. Mineev D.A. *Lantanoidy v mineralakh* [Lanthanoids in minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 184 p.
39. Yang W.-B., Niu H.-C., Shan Q., Sun W.-D., Zhang H., Li N.-B., Jiang Yu-H., Yu X.-Y. Geochemistry of magmatic and hydrothermal zircon from the highly evolved Baerzhe alkaline granite: implications for Zr-REE-Nb mineralization. *Miner. Deposita*, 2014, vol. 49, Iss. 4, pp. 451–470.
40. Dobretsov N.L., Borisenko A.S., Izokh A.E., Zhmodik S.M. Termokhronologicheskaya model permo-triasovykh mantiynykh plumov Evrazii kak osnova dlya vyavleniya zakonornostey formirovaniya i prognoza medno-nikelevykh, blagorodno- i redkometallnykh mestorozhdeniy [Thermochemical model of Eurasian Permo-Triassic mantle plums as a basis for prediction and exploration for Cu-Ni-PGE and rare-metal ore deposits]. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 9, pp. 1159–1187.

Received: 23 April 2016.

#### Information about the authors

Anatoliy I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai Humanities Pedagogical University.