



УДК (552.3:550.42):551.734(571.151)

ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ ПОРОДНЫХ ТИПОВ БОРОВЛЯНСКОГО КОМПЛЕКСА ГОРНОГО АЛТАЯ

А. И. Гусев, Н. И. Гусев

Рассмотрены петрография, петрология, геохимия и генезис гранитоидов боровлянского комплекса позднедевонского возраста. Выделены четыре фазы внедрения и приведены доказательства существования самостоятельной фазы лейкогранитов, имеющих большое металлогеническое значение. Ранние фазы внедрения формировались за счет плавления амфиболитов и граувакк. Геохимические данные указывают на то, что диориты и гранодиориты генерировались в результате плавления мантийных субстратов, содержащих гранат. Фракционированные лейкограниты заключительной фазы формировались за счет плавления пелитов и ассимиляции пелитового материала коры. В породах комплекса отмечаются два типа тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов: W и M, обусловленных различным флюидным режимом и насыщенностью водой и плавиковой кислотой. Уменьшение тетрадного эффекта W-типа сопровождается слабым увеличением отношения Eu/Eu^* . В них проявлено «не заряд-радиус-контролируемое» поведение редких и редкоземельных элементов. По комплексу признаков лейкограниты потенциально перспективны на редкометальное и редкоземельное оруденение.

Ключевые слова: петрология, петрогеохимия, гранитоиды, фракционированные лейкограниты, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ.

GEOCHEMISTRY AND PETROLOGY OF THE BOROVLYANKA COMPLEX ROCK TYPES, GORNYI ALTAI

A. I. Gusev, N. I. Gusev

The article considers petrography, petrology, geochemistry and genesis of the Borovlyanka Late Devonian granitoid complex. Four stages of intrusion are distinguished and evidences for the existence of independent stage of leucogranites possessing a significant metallogenic importance are given. Early intrusion stages have been formed due to the melting of amphibolites and greywackes. Geochemical data indicate that diorites and granodiorites have been generated as a result of melting of mantle substrates containing garnet. Fractionated leucogranites of the final stage have been formed owing to the melting of pelites and assimilation of pelitic crust material. The complex rocks are characterized by two types of tetradic effect of rare-earth elements fractionation: W- and M-types resulting from diverse fluid regimes and water and hydrofluoric acid. Decrease in tetradic effect of W-type is accompanied by weak increase of Eu/Eu^* ratio. They reveal “non-CHARAC” behavior of rare and rare-earth elements. According to the set of features leucogranites are potentially promising for rare-metal and rare-earth mineralization.

Keywords: petrology, petrogeochemistry, granitoids, fractionated leucogranites, tetradic effect of rare-earth elements fractionation.

Гранитоиды боровлянского комплекса выделены из состава Талицкого плутона, закартированы при крупномасштабной геологической съемке и приурочены к Талицкому блоку. Гранитоиды слагают небольшие массивы (Мяснушинский, Прясличный, Татарский, Медвежинский, Куртачихинский, Правощебетинский), прорывающие гранитоиды Верхнебашеакского и Казандинского массивов. Юго-восточнее располагаются Талицкий и Боровлянский массивы.

По вопросу выделения фаз внедрения в массивах боровлянского комплекса не существует единого мнения, как и по вопросам их генезиса и принадлежности к стандартным типам гранитов. В описываемом ареале обычно выделяют три фазы, но в недавно изданной монографии Ю. А. Туркин и С. И. Федак [7] вслед за В. А. Кривчиковым [3] – две. Мы считаем, что в составе комплекса четыре фазы внедрения.

Наиболее ранняя фаза представлена диоритами, выявленными в Талицком и Боровляньском массивах в их краевых частях в виде круп-

ных ксенолитов среди гранодиоритов размерами (5–10)×(20–55) м. Биотитовые гранодиориты и меланократовые граниты второй фазы обнажаются в составе Боровлянского массива.

Мяснушинский, Татарский, Медвежинский, Куртачихинский, Правощебетинский массивы сложены светло-серыми средне-крупнозернистыми, нередко порфиroidными биотитовыми гранитами (40 %) третьей фазы и мусковитовыми лейкогранитами (60 %) четвертой. Жильные образования представлены мелкозернистыми аплитовидными гранитами, аплитами, пегматитами. В магнитном поле гранитоиды выделяются высокоградиентными отрицательными аномалиями линейного типа интенсивностью до 3,5 мЭ, в гравитационном поле они не выражены. Контакты всех тел резкие, крутопадающие. При приближении к ним в интервале 0–1 м среднезернистые биотитовые порфиroidные граниты сменяются мелкозернистыми биотитовыми, затем аплитовидными; в последних отмечаются мелкие ксенолиты гранитоидов усть-беловского



комплекса. Экзоконтактовые изменения вызывают мощное ороговикование терригенных пород горноалтайской серии. Ширина контактовых ореолов достигает 4 км. Роговики представлены кордиерит-биотитовыми и биотитовыми разновидностями амфибол-роговиковой фации, массивными вблизи контактов и грубосланцеватыми или полосчатыми на расстоянии 0,5–1 км. Внутреннее строение массивов однородное. Татарский массив сложен исключительно средне-крупнозернистыми биотитовыми лейкогранитами, в Мяснушинском, Прясличном и Куртачихинском преобладают биотитовые граниты, фациально не замещающиеся лейкогранитами. Последние имеют с гранитами интрузивные и термостатированные контакты, указывающие на их самостоятельную фазовую природу. Особенности Правощебетинского массива – наличие ксенолитов роговообманковосодержащих гранитов Казандинского массива и повышенная концентрация мусковита в результате экзоконтактовой грейзенизации со стороны более молодого Щебетинского массива.

Диориты – массивные однородные породы. Они образуют линзовидные тела протяженностью до нескольких десятков метров. Состав диоритов (%): плагиоклаз 50–60, роговая обманка 18–20, клинопироксен 5, ортопироксен 3–4, калиевый полевой шпат 1–2. Структура породы гипидиоморфнозернистая, местами призматически-зернистая. Интрателлурическая фаза диоритов, кварцевых диоритов представлена крупными таблитчатыми выделениями зонального плагиоклаза размером до 1–1,5 см. В ядрах таких кристаллов присутствует лабрадор (An_{56-53}), редко битовнит (An_{70-72}). Периферическая каемка зональных кристаллов выполнена андезином (An_{31-42}), а их центральные части часто замещены карбонатом, хлоритом, эпидотом. Вторая генерация плагиоклаза, распространенного в основной массе породы, представлена полисинтетически сдвоенным андезином (An_{34-43}), а калиевый полевой шпат – несдвоенным микроклином, реже микроклин-пертитом. Среди темноцветных минералов доминирует роговая обманка, реже отмечаются клинопироксен (авгит с железистостью $f = 31,5-33,3$; глиноземистостью $l = 2,0-2,1$) и ортопироксен (клиногиперстен с $f = 48,0-48,2$, $l = 1,02-1,1$). Оба минерала по периферии интенсивно замещены эпидотом, хлоритом. Бурая роговая обманка (паргасит с $f = 35,0-36,4$, $l = 17,2-17,7$) имеет призматические и таблитчатые выделения. Замещается эпидотом и хлоритом. Аксессуары (апатит, магнетит, сфен, пирит) редки. По химизму это низкотитанистые породы с преобладанием натрия над калием и двухвалентного железа над трехвалентным. Суммарные концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) в них максимальны (220,82 г/т). Отношения Th/Yb в диоритах мини-

мальные среди породных типов боровлянского комплекса.

Гранодиориты – среднезернистые породы светло-серой окраски, иногда с розоватым оттенком. Состав гранодиоритов (%): кварц 15–22, плагиоклаз 29–47, роговая обманка 5–12, биотит 4–10, калиевый полевой шпат 10–12. Аксессуары – магнетит, пирит, циркон, апатит (короткостолбчатый). Плагиоклаз образует несколько генераций. Наиболее ранняя представлена зональными кристаллами (размером до 0,8 см), ядерные части которых сложены лабрадором (An_{51-55}) и часто интенсивно сосюритизированы, а их краевые части – андезином (An_{31-33}). Вторая генерация характеризуется полисинтетическим двойникованием и также имеет зональное строение. Плагиоклаз этих кристаллов (3–5 мм) сложен олигоклазом (An_{24-25}) с тонкой краевой каемкой альбита (An_{8-9}). Калиевый полевой шпат диагностируется микроклин-пертитом, как правило, несдвоенным. Роговая обманка относится к обыкновенной с умеренными железистостью и глиноземистостью ($f = 54,1$, $l = 24,0$). Листочки и чешуйки бурого биотита относятся к группе сидерофиллита-аннита ($f = 55,3-55,8$; $l = 31,2-32,0$). Это также низкотитанистые породы, в которых соотношения натрия и калия близки, иногда последний преобладает. В гранодиоритах сравнительно с диоритами гораздо ниже сумма РЗЭ (157,06 г/т).

Граниты состоят из кварца (37,2 %), микроклин-пертита (25,1 %), слабо зонального (до № 27 в ядре, № 11 в кайме) плагиоклаза (32,3 %), умеренно железистого ($f = 62-73$) биотита (4,2 %), реже мусковита и граната. Вторичные минералы представлены серицитом, хлоритом. Состав акцессорных минералов (г/т): магнетит (478), апатит (110), циркон (71), ильменит (50), монацит (11,5), ортит (11), турмалин (7), сфен (1,3). Структуры гипидиоморфнозернистая, монзонитовая, порфирировидная за счет мегакристаллов калиевого полевого шпата, реже плагиоклаза. Петрохимические особенности гранитов – умеренная щелочность при близких содержаниях натрия и калия, высокая глиноземистость (индекс Шенда 1,1), низкие коэффициенты агапайности (0,58) и окисленности железа (0,24), умеренно низкая известковистость ($CaO = 2,1$ %). Из всех породных типов боровлянского комплекса граниты характеризуются минимальными концентрациями суммы РЗЭ (82,4 г/т) и максимальными отношениями Ce/Yb и Zr/Yb (табл. 1), а также Eu/Eu* (1,54).

Лейкократовые гранитоиды, по материалам С. А. Кузнецова, отличаются преобладанием кварца над микроклин-пертитом и слабо зональным олигоклазом, присутствием умеренно железистого ($f = 62-73$) биотита и акцессорных минералов, представленных (г/т) магнетитом (478), апатитом (110), цирконом (71), ильменитом (50), монацитом (11,5), ортитом (11), турмалином (7), сфеном (1,3), гранатом (1,0); в отдельных случаях фиксиру-



Таблица 1

Средние составы редких и редкоземельных элементов в породных типах боровлянского комплекса

Химические элементы и их отношения	Диориты, n = 3	Гранодиориты, n = 3	Граниты, n = 7	Лейкограниты, n = 9
Li	52,1	51	42,2	22,5
Be	2,5	2,4	0,83	0,6
Sc	20,5	17,2	4,1	7,1
V	135,2	125,4	17,2	9,9
Cr	51,3	45,1	23,5	15,0
Co	13,7	10,2	3,3	2,6
Ni	58,1	25,6	46,5	56,2
Ga	14,1	16,4	21,8	22,5
Rb	97,2	102	126,7	112,1
Sr	304	282	204	218
Y	53,3	51,5	33,1	30,1
Zr	390,4	375	117,5	113,1
Nb	34,4	33,7	11,5	11,0
Cs	7,5	8,7	7,0	4,6
Ba	807	745	712	1102
La	98,1	44,4	18,3	29,3
Ce	69,5	66,5	30,7	33,2
Pr	11,1	10,3	8,1	8,4
Nd	17,2	15,6	7,8	8,3
Sm	5,3	4,5	2,9	1,8
Eu	1,5	1,3	0,9	0,32
Gd	4,1	3,7	0,31	0,29
Tb	0,62	0,55	0,32	0,3
Dy	4,2	3,1	2,5	1,3
Ho	1,1	0,8	0,6	0,5
Er	1,3	1,2	0,4	0,35
Tm	0,9	0,7	0,22	0,13
Yb	5,2	4,2	3,4	2,8
Lu	0,7	0,51	0,25	0,15
Pb	21,1	23,3	23,1	29,5
Th	7,2	7,7	8,2	8,1
U	1,8	2,1	2,2	2,0
Mo	13,1	13,6	5,1	1,5
Sn	6,9	6,8	6,6	4,6
F	545	833	454	305
∑PЗЭ	220,82	157,06	82,4	86,35
La/YbN	9,25	10,5	5,4	9,8
La/SmN	11,34	6,02	3,87	9,96
Eu/Eu*	0,96	0,95	1,54	0,85
Th/Yb	1,38	1,83	2,41	2,89
Ce/Yb	13,36	15,83	9,03	11,96
Zr/Yb	75,07	89,3	34,5	40,4

Примечание. Анализы выполнены методами ICP-MS и ICP-AES в лаборатории ИМГРЭ (Москва).

ется присутствие пинита, развитого, вероятно, по кордиериту или андалузиту.

По нашим данным, лейкограниты следует выделять в самостоятельную фазу внедрения на основании секущих интрузивных контактов, задокументированных нами в Боровлянском, Куртачихинском и других массивах [6]. Лейкограниты четвертой фазы представлены мусковитовыми разностями и состоят из кварца (40–41 %), калиевого полевого шпата (ортоклаза) (25–27 %), альбит-олигоклаза № 10–14 (28–30 %), мусковита (2–5 %). В полевом шпате повсеместно отмечаются вроски мелкочешуйчатого мусковита и серицита, приуроченные к ядерной части зерен. Местами в пините наблюдаются зерна кордиерита. Биотит лейкогранитов в отличие от гранитов характеризуется повышенной концентрацией титана и суммарного содержания железа; коэффициент титанистости также повышен ($t = 14–15$) [6].

Часто наблюдаются монцитовая и порфирированная структуры за счет развития мегакри-

сталлов калиевого полевого шпата и, реже, плагиоклаза. Породы характеризуются повышенной глиноземистостью (индекс Шенда 1,11), низким уровнем щелочности с преобладанием K_2O (4,2%) над Na_2O (3 %) и низким коэффициентом окисленности железа (0,26). В лейкогранитах отмечаются максимальные в сравнении с лейкогранитами других комплексов содержания бария (1005 г/т), стронция (220 г/т) и молибдена (3,4 г/т). Сумма PЗЭ в лейкогранитах несколько выше, чем в гранитах (86,35 г/т); отношения Th/Yb максимальны среди породных типов боровлянского комплекса, а Eu/Eu* (0,85) – минимальны (см. табл. 1).

Из табл. 1 следует, что микроэлементный состав лейкогранитов резко отличается от состава гранитов предыдущей фазы: концентрации Sc, Ba, La значительно выше, а F, Li, Cr, Rb – ниже. Лейкограниты характеризуются весьма высокими отношениями La/YbN и La/SmN в отличие от гранитов, и, таким образом, тип распределения PЗЭ в них сильно фракционированный.

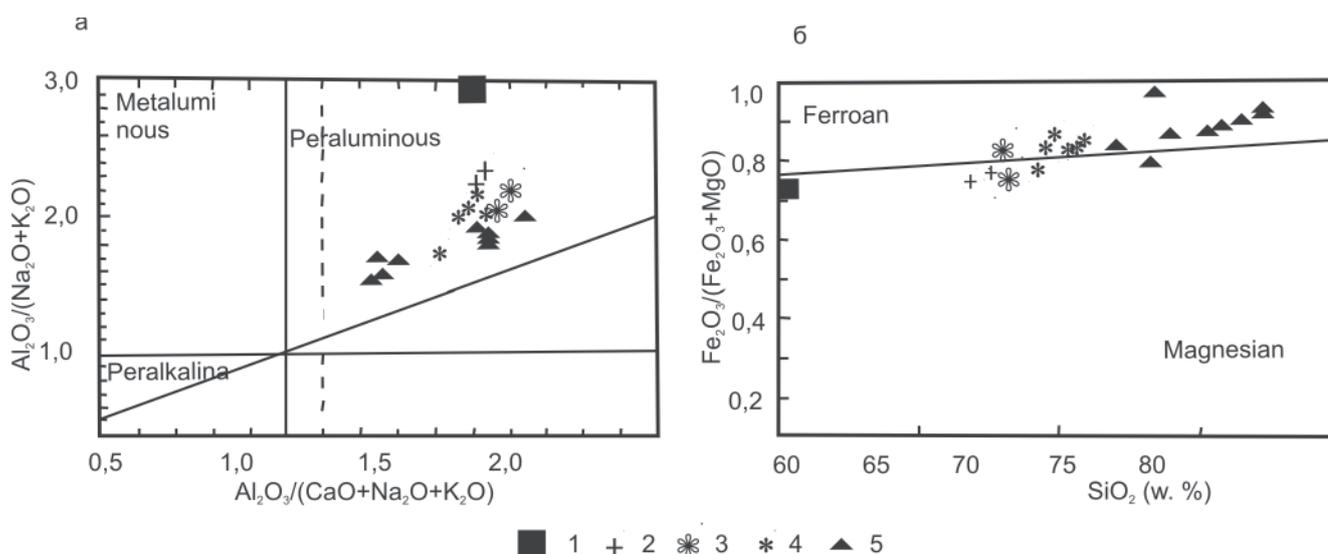


Рис. 1. Диаграммы соотношений для пород боровлянского комплекса: а – $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ по [13]; б – $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ по [16]

Породы боровлянского комплекса: 1 – диориты, 2 – гранодиориты, 3 – граниты, 4 – меланограниты, 5 – лейкограниты

По сумме признаков все перечисленные массивы боровлянского комплекса имеют различный эрозионный срез: наиболее глубокий – в Боровлянском, несколько меньше – в Талицком, самый малый – в Куртачихинском. Подобная картина коррелирует и с разной рудоносностью массивов. При этом Куртачихинскому массиву, сложенному преимущественно лейкогранитами заключительной фазы, свойственна и наиболее высокая редкометалльность. Здесь чаще всего встречаются тела пегматитов и грейзенов, поставивших в аллювиальные россыпи монацит. Для сравнения поведения породообразующих элементов в гранитном породном типе составлена табл. 2, показывающая различные концентрации элементов в зависимости от уровня среза массива.

Анализ табл. 2 показывает, что от наиболее глубоко эродированного массива к менее эродированному закономерно увеличиваются кремнекислотность гранитов и оксида натрия, отношения натрия к калию и уменьшаются содержания титана, глинозема, магния. В результате анализа поведения других компонентов сделан вывод, что в менее эродированных лейкогранитах Куртачихинского массива увеличиваются концентрации фтора и сопутствующих ему элементов (W, Mo, Li, Sn, Nb), тем самым увеличивая его редкометалльность.

Позднедевонский возраст комплекса установлен на основании данных абсолютной геохронологии: 362 ± 8 млн лет (U/Pb метод по цирконам),

360 млн лет (изохронный Rb/Sr метод) – и отвечает фаменскому уровню.

Соотношения $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ позволяют включать все породные типы боровлянского комплекса в пералюминиевый тип, а $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ указывает на принадлежность пород ранних фаз комплекса к магнезиальным разностям, а поздних – к железистым (рис. 1).

На спайд-диаграмме все породные типы по макро- и микроэлементному составу образуют согласованные графики и характеризуются резким деплетированием на уран, ниобий, неодим, иттрий (рис. 2). В то же время эта диаграмма показывает обогащенность всех пород комплекса барием, калием, стронцием, фосфором, натрием. По данным Л. Вайборна и др. [15], гранитоиды боровлянского комплекса можно отнести к стронций-недеплетированному и иттрий-деплетированному типу. Формирование таких гранитоидов предполагает существование верхнемантийного источника [15] и исключает их островодужную или окраинно-континентальную природу. Такие магмы выплавляются из источника, обогащенного гранатом, что подтверждается их деплетированностью на иттрий (см. рис. 2) и, вероятно, связано с активностью мантии при формировании магм боровлянского комплекса.

На диаграммах, построенных для экспериментальных расплавов, гранитоиды боровлян-

Таблица 2

Средние концентрации основных породообразующих элементов в гранитах массивов с различным эрозионным срезом

Массив	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O
Куртачихинский	71,23	0,35	13,68	0,89	2,42	0,08	0,77	2,08	2,98	3,45	0,86
Талицкий	71,09	0,46	13,88	1,41	2,35	0,10	1,03	1,62	2,67	4,36	0,61
Боровлянский	70,82	0,50	14,46	0,83	2,29	0,07	1,09	2,32	2,53	4,17	0,60

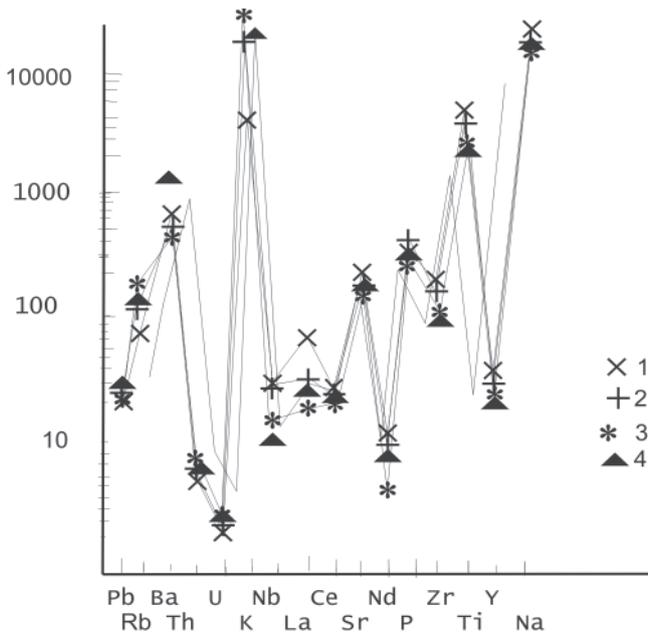


Рис. 2. Спайд-диаграмма по [15] для породных типов боровлянского комплекса

1 – диориты, 2 – гранодиориты, 3 – граниты, 4 – лейкограниты

ского комплекса тяготеют к расплавам, образовавшимся за счет разнородных протолитов: ранние фазы сформированы за счет плавления амфиболитов, а все остальные породы – метаграувак и фельзических пелитов (рис. 3). Ультракислые породы боровлянского комплекса располагаются на максимуме степени известково-щелочного фракционирования ортоклаза и альбита (см. рис. 3, г). Экспериментально установлено, что этой ситуации могут отвечать уменьшение щелочности в процессе взаимодействия вода – породы или небольшая степень ассимиляции пелитов, которые и будут легко увеличивать показатель A/CNK. Именно ассимиляция пелитов и имела место в генерации конечных дифференциатов боровлянского комплекса – лейкогранитов.

На диаграмме La/Nb – Ce/Y [9] отчетливо видно разделение породных типов боровлянского комплекса: фигуративные точки диоритов и гранодиоритов локализируются вблизи тренда плавления мантии, а последующих фаз (гранитов и лейкогранитов) – располагаются вблизи кривой смешения с коровым материалом (рис. 4). Это смешение

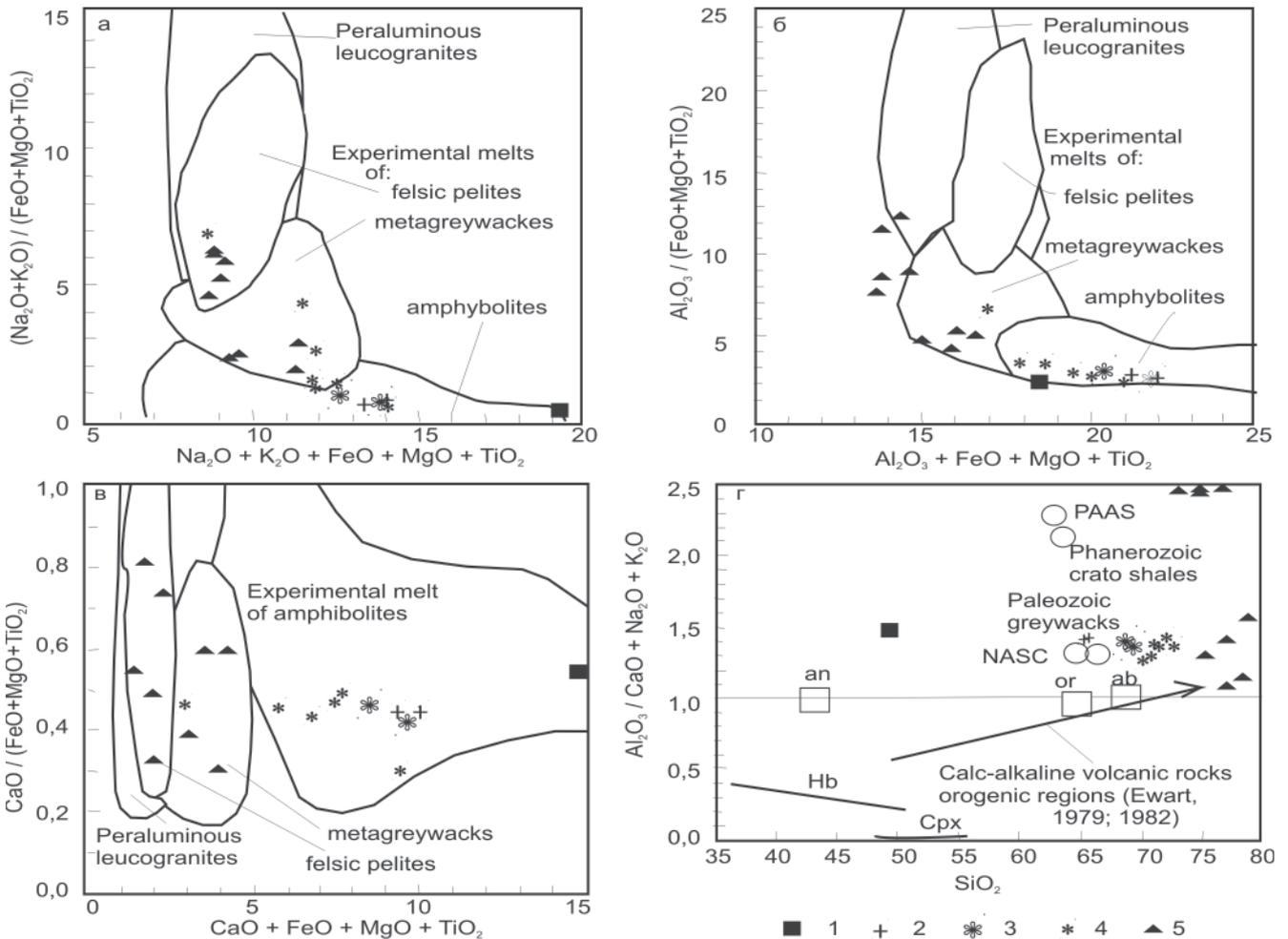


Рис. 3. Экспериментальные диаграммы для пород боровлянского комплекса: а, б, в – диаграммы композиционных экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), метаграувак и амфиболитов [14]; г – диаграмма SiO_2 – A/CNK. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов по [11]; A – Al_2O_3 , CNK – сумма CaO, Na_2O , K_2O

Усл. обозн. см. на рис. 1

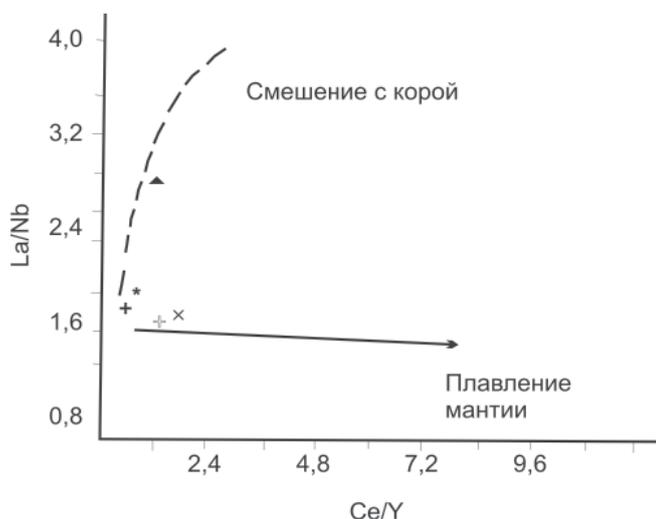


Рис. 4. Диаграмма соотношений Ce/Y – La/Nb по [9] для породных типов бровлянского комплекса
Усл. обозн. см. на рис. 2

происходило в глубинном магматическом очаге, возможно, на путях движения магмы к поверхности или в процессе внедрения поздних дериватов комплекса во вмещающие породы.

Ценную информацию по вещественному составу пород (петрогеохимии) дает анализ распределения редких и редкоземельных элементов в различных петрогеохимических типах гранитоидов [1, 5, 12]. Так, геохимическое поведение Zr и Hf в магматических процессах близкое, а их отношение в большинстве земных и внеземных (в метеоритах) пород почти постоянное (около 38 ± 2 , в хондритах – $36,0$). Однако отношения Zr/Hf редуцированы в лейкогранитах ($19,9\text{--}31,7$) и близки к хондритовым в гранодиоритах и меланогранитах ($35,2\text{--}38,5$).

В породах боровлянского комплекса выявлены два типа тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ (М-тип и W-тип). Соотношения ред-

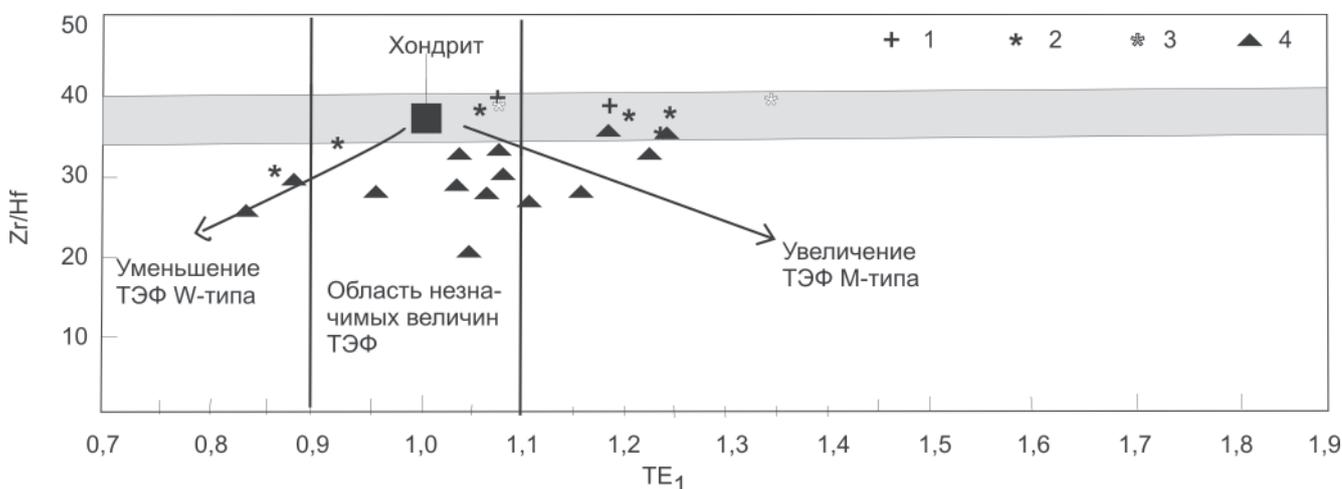


Рис. 5. Диаграмма Zr/Hf – TE_1 (по [12]) для гранитоидов боровлянского комплекса. Серая область отвечает только отношениям элементов (Zr и Hf), но не TE_1 . Хондритовые значения приняты по [8]
Усл. обозн. см. на рис. 1

ких элементов и значений тетрадного эффекта весьма показательные.

Так, на диаграмме соотношений Zr/Hf – TE_1 отчетливо видно, что с увеличением тетрадного эффекта М-типа и уменьшением W-типа снижается отношение Zr/Hf на значения, меньшие или большие, чем у хондритов (рис. 5).

На диаграмме Y/No – TE_1 фигуративные точки составов пород (а также хондритов) и области варьирования составов магматических пород занимают различные позиции относительно друг друга (рис. 6). Подавляющая часть составов пород близка к области варьирования составов магматических пород, но для разновидностей с повышенным значением М-типа ТЭФ РЗЭ и пониженным W-типа отмечается сильное изменение соотношений редких земель первой тетрады РЗЭ, а также Y и No.

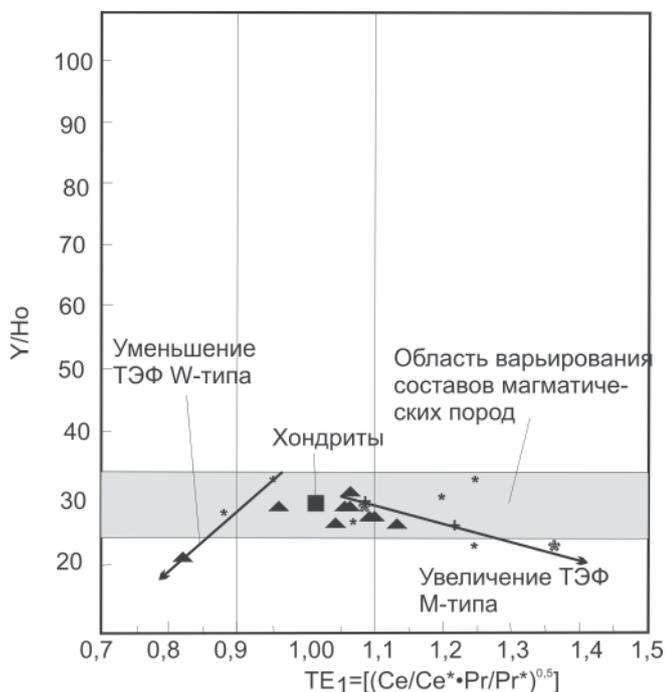


Рис. 6. Диаграмма Y/No – TE_1 для гранитоидов боровлянского комплекса
Усл. обозн. см. на рис. 1 и 5

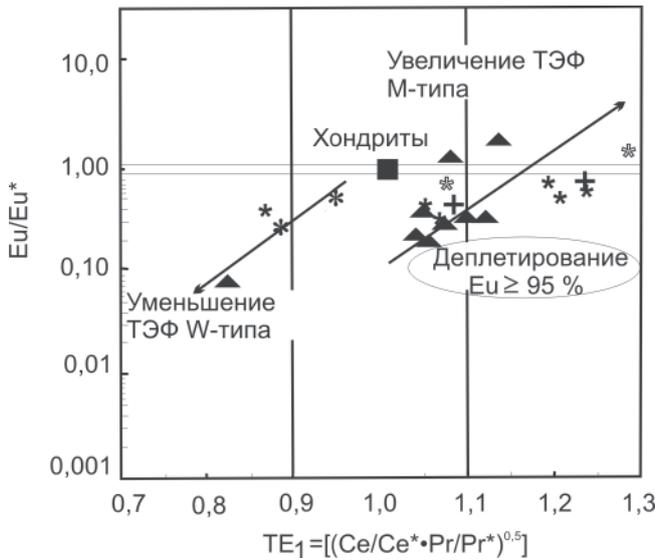


Рис. 7. Диаграмма $Eu/Eu^* - TE_1$ для гранитоидов боровлянского комплекса

Усл. обозн. см. на рис. 2

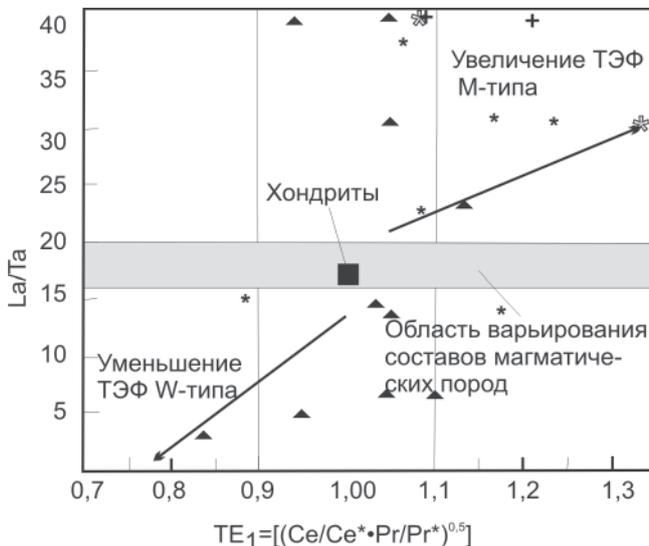


Рис. 8. Диаграмма $La/Ta - TE_1$ для гранитоидов боровлянского комплекса

Усл. обозн. см. на рис. 1 и 5

На диаграмме $Eu/Eu^* - TE_1$ соотношения для первой тетрады также дают различные тренды для М- и W-типов ТЭФ РЗЭ (рис. 7). Хорошо заметно, что увеличение ТЭФ М-типа первой тетрады коррелирует с уменьшением Eu/Eu^* . Обратная картина наблюдается для пород боровлянского комплекса с выраженным W-типом: уменьшение ТЭФ W-типа сопровождается слабым ростом Eu/Eu^* .

Европиевая негативная аномалия ($\epsilon \geq 95\%$ Eu деплетированием на рис. 7) для пород боровлянского комплекса не может быть объяснена традиционной сепарацией полевых шпатов в расплаве, хотя была зафиксирована позитивная аномалия Eu в коэффициенте распределения модели РЗЭ в расплавах. В последние годы установлено, что первопричиной ТЭФ РЗЭ в высоко эволюционированных гранитоидных магмах было взаимодействие магма – флюид, которое не только

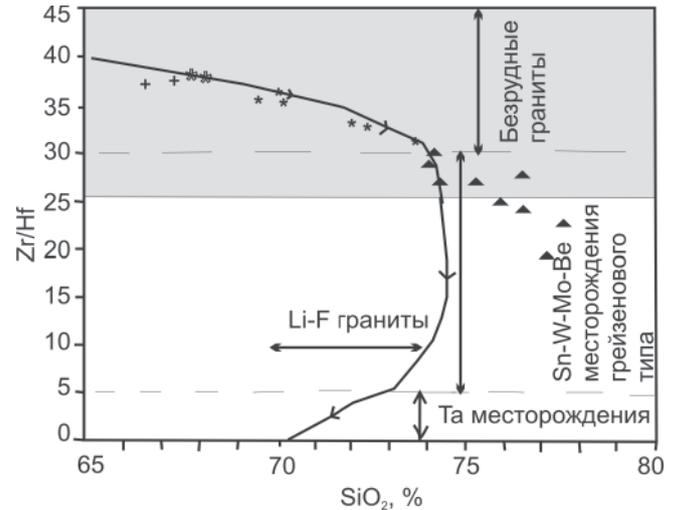


Рис. 9. Диаграмма $Zr/Hf - SiO_2$ по [2] для пород боровлянского комплекса. Серым фоном показано поле HARAC (Charge-and-Radius-Controlled) по [10]. Дугообразная линия со стрелками – кривая фракционирования расплавов редкометалльных гранитов и поля металлогенической специализации гранитоидов по [2]

Усл. обозн. см. на рис. 1

создает деплетирование Eu в породах, но и вызывает необычную негативную аномалию во всех конституционных минералах, включая и калиевый полевой шпат [17].

Сравнение отношений Eu/Eu^* для обоих массивов показывает: чем оно выше, тем выше кислотность среды, согласно рядам кислотности – щелочности А. А. Маракушева [4] для ряда элементов Sm, Gd, Eu в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях. Следовательно, при становлении массивов боровлянского комплекса и формирования грейзенового оруденения W и Be кислотность среды была выше, чем при генерации более ранних породных типов комплекса.

На диаграмме $La/Ta - TE_1$ тренды фигуративных точек для W- и М-типов ТЭФ РЗЭ имеют противоположные (параллельные) тренды (рис. 8).

Особенно показательны соотношения La/Ta относительно TE_1 . Отчетливо заметно положение трендов относительно области варьирования составов магматических пород по обе стороны от средних значений в хондритах. Уменьшение ТЭФ первой тетрады W-типа сопровождается уменьшением отношения La/Ta , и наоборот.

Такое «не заряд-радиус-контролируемое» («non-CHARAC» в англоязычной литературе) поведение редкоземельных и других элементов не связано с процессами гидротермального изменения пород, так как в них $U/Th \ll 1$ (см. табл. 1), что указывает на отсутствие значимых гидротермальных наложенных процессов. Скорее всего, такое изменение поведения элементов – следствие трансформации магмогенных флюидов за счет контаминации сильно обводненного корового материала и дальнейшего взаимодействия расплав – флюид в процессе становления и кри-



сталлизации интрузивов. Все породные типы, рассмотренные нами в данной статье, отобраны также с учетом изучения их в шлифах для получения достоверной информации по их неизменности наложенными процессами.

На диаграмме $Zr/Hf - SiO_2$ фигуративные точки составов пород комплекса преимущественно располагаются вдоль кривой фракционирования расплавов редкометалльных гранитоидов и в поле «заряд-радиус-контролируемое» поведение элементов (рис. 9). Наиболее фракционированные лейкограниты тяготеют к области «non-CHARAC» и попадают в поле Sn-W-Mo-Be грейзеновых месторождений.

Таким образом, гранитоиды боровлянского комплекса следует считать мультифазовыми образованиями, сформировавшимися в четыре фазы внедрения. Все породные типы боровлянского комплекса относятся к пералюминиевому типу, а соотношение $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ указывает на принадлежность пород ранних фаз комплекса к магнезиальным разностям, а поздних – к железистым. При становлении массивов боровлянского комплекса и формировании грейзенового оруденения (W, Mo и Be) кислотность среды и фтороносность флюидов были выше, чем при генерации более ранних породных типов.

Европиевая негативная аномалия в породах комплекса вызвана взаимодействием магмы и флюида. Это же взаимодействие привело к тому, что в породах комплекса проявляются W- и M-типы ТЭФ РЗЭ.

Заключительная фаза наиболее эволюционированных лейкогранитов формировалась за счет плавления пелитов. Располагаясь на максимуме степени известково-щелочного фракционирования ортоклаза и альбита в расплаве, лейкограниты боровлянского комплекса (в отличие от остальных породных типов) генерировались за счет дегидратационного плавления материала, содержащего слюды, все остальные породы – за счет дегидратационного плавления амфибола. Именно фракционированные лейкограниты, обогащенные фтором и железом, показывают «не заряд-радиус-контролируемое» поведение циркония, гафния и РЗЭ («non-CHARAC») и попадают в поле Sn-W-Mo-Be грейзеновых месторождений, будучи наиболее металлогенически важными породами. С наименее эродированными лейкогранитами Куртачихинского массива связаны пегматитовые и грейзеновые проявления, поставляющие в многочисленные россыпи монацит, а с более эродированными массивами – грейзеновые проявления и месторождения W и Mo [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусев, А. И.** Шошонитовые гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим и орудене-

ние [Текст] / А. И. Гусев, А. А. Гусев. – М.: Академия Естествознания, 2011. – 128 с.

2. **Зарайский, Г. П.** Цирконий-гафниевый индикатор фракционирования редкометалльных гранитов [Текст] / Г. П. Зарайский, А. М. Аксюк, В. Н. Девятков // Петрология. – 2009. – № 1. – С. 28–50.

3. **Кривчиков, В. А.** Геологическая карта масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Сер. Алтайская. Лист М-45-1 (Солонешное): Объяснительная записка [Текст; карты] / В. А. Кривчиков, П. Ф. Селин, Г. Г. Русанов. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2001. – 183 с.

4. **Маракушев, А. А.** Термодинамические факторы образования рудной зональности [Текст] / А. А. Маракушев // Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.

5. **Петрология** и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Солонешенского рудного района Алтая [Текст] / А. И. Гусев, Н. И. Гусев, Е. М. Табакаева [и др.]. – Бийск: АГАО, 2013. – 204 с.

6. **Петрология** и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Талицко-Бацелакского района Алтая [Текст] / А. И. Гусев, С. В. Попов, Е. М. Дзгоева, Н. В. Белозерцев. – Бийск: Изд-во БПГУ, 2010. – 205 с.

7. **Туркин, Ю. А.** Геология и структурно-вещественные комплексы Горного Алтая [Текст] / Ю. А. Туркин, С. И. Федак. – Томск: Изд-во STT, 2008. – 480 с.

8. **Anders, E.** Abundances of the elements: meteoric and solar [Text] / E. Anders, N. Greevesse // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1989. – Vol. 53. – P. 197–214.

9. **Barbarin, B.** A Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [Text] / B. Barbarin // Lithos. – 1999. – Vol. 46. – P. 605–626.

10. **Bau, M.** Controls on the fractionation of iso-valent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [Text] / M. Bau // Contrib. Miner. Petrol. – 1996. – Vol. 123. – P. 323–333.

11. **Ewart, A.** A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary – Recent dacitic, latitic, rhyolitic and related salic rocks [Text] / A. Ewart // Trondjemites, Dacites and Related Rocks. – Amsterdam: Elsevier, 1979. – P. 13–121.

12. **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 [Text] / W. Irber // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1999. – Vol. 63, N 3/4. – P. 489–508.

13. **Maniar, P. D.** Tectonic discrimination of granitoids [Text] / P. D. Maniar, P. M. Piccoli // Geol. Soc. Amer. Bull. – 1989. – Vol. 101. – P. 635–643.

14. **Patiño Douce, A. E.** What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origins of granitic magmas? [Text] / A. E. Patiño Douce // Geol. Soc. London. Spec. Publ. – 1999. – Vol. 168. – P. 55–75.



15. **Proterozoic** granite types in Australia: implications of lower crust composition, structure and evolution [Text] / L. A. I. Wyborn, D. Wyborn, R. G. Warren, B. J. Drummond // Trans. Royal Soc. of Edinburgh – Earth Sciences. – 1992. – Vol. 83. – P. 201–209.

16. **Villaseca, C.** A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental

orogenic belts [Text] / C. Villaseca, L. Barbero, V. Herberos // Trans. Royal Soc. of Edinburgh – Earth Science. – 1998. – N 89. – P. 113–119.

17. **Zhao, Z. H.** REE and O-Pb-Sr-Nd isotopic compositions and petrogenesis of the Altai granitoids [Text] / Z. H. Zhao // New Development of Solid Earth Science in Northern Xinjiang. – Beijing : Science Publishing Co, 1993. – P. 239–266.

© А. И. Гусев, Н. И. Гусев, 2014

ГУСЕВ Анатолий Иванович

Алтайская государственная академия образования им. В. М. Шукшина (ФГБОУ ВПО «АГАО»), Бийск, д. г.-м. н. профессор
E-mail: anzerg@mail.ru

ГУСЕВ Николай Иванович

ФГУП «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, нач. отдела
E-mail: nikolay_gusev@vsegei.ru

GUSEV Anatolii, DSc, prof., Shukshin Altai State Academy of Education (ASAE), Bijsk, Russia

E-mail: anzerg@mail.ru

GUSEV Nikolai, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), Saint Petersburg, Russia

E-mail: nikolay_gusev@vsegei.ru