



ПЕТРОЛОГИЯ И РУДОНОСНОСТЬ ВЫСОКОКАЛИЕВЫХ АДАКИТОВЫХ ГРАНИТОИДОВ МАКАРЬЕВСКОГО АРЕАЛА ГОРНОГО АЛТАЯ

А. И. Гусев

Рассмотрены геологические особенности, петрология, геохимия, абсолютный возраст и генезис гранитоидов Макарьевского ареала Горного Алтая (Черноключевской, Сосновский, Усть-Осиновский, Щемиловский, Макарьевский и другие массивы). Выделено пять фаз, включающих габброиды, диориты, гранодиориты, тоналиты, тронджемиты, лейкограниты. Приведено определение уран-свинцового возраста гранитоидов (349–353 млн лет), значительно отличающееся от других ареалов распространения пород усть-беловского комплекса. В строении массивов отмечена прямая зональность с локализацией ранних фаз по периферии, а более поздних – в центре. Гранитоиды разgneйсованы. По петрогеохимическим данным кислые разновидности показывают признаки высококремнистых адакитовых гранитоидов. Габброиды ранней фазы Макарьевского ареала, вероятно, были генерированы частичным плавлением слэба, представленного флюид-метасоматизированным мантийным перидотитом. Более поздние дериваты возникли вследствие смешения базитовой и адакитовой родоначальной коры, преобразованной в ходе погружения в амфиболиты или эклогиты. Адакитовые гранитоиды формировались частичным плавлением (степень плавления около 50 %) 10 % гранатового амфиболита. Высокая флюидонасыщенность расплавов приводила к трансформации соотношений многих элементов с проявлением тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М- и W-типов. Пространственно и парагенетически с гранитоидами Макарьевского ареала связаны проявления золота и меди скарнового и жильного типов.

Ключевые слова: габбро, диориты, тоналиты, тронджемиты, лейкограниты, высококремнистые адакиты, высококалийевые адакиты, тетрадный эффект, РЗЭ, золотое оруденение.

PETROLOGY AND ORE CONTENT OF HIGH-POTASSIC ADAKITE GRANITOIDS OF THE MAKARYEVSKY RANGE IN GORNY ALTAI

A. I. Gusev

The paper considers geological features, petrology, geochemistry, absolute age, and genesis of granitoids of the Makaryevsky geographical range in Gorny Altai. It envelopes the Chernoklyuchevsky, Sosnovsky, Ust'-Osinovsky, Shchemilovsky, Makaryevsky and other massives. Five phases were singled out which include gabbroids, tonalites, trondhjemites, and leucogranites. The U-Pb age of granitoids was determined to be 349-353 mln years, which is different from other rock extension areas of the Ust'-Belovsky complex. The massives structure is characterized by direct zonation with the early phases localized peripherally and the later phases in the middle. Granitoids were foliated. According to petrogeochemical data, felsic varieties have features of high-silica adakite granitoids. Gabbroids of the early phase of the Makaryevsky range were probably generated by partial melting of the slab represented by fluid-metasomatized mantle peridotite. And the later derivatives originated by mixing of basite and adakite parent magmas. Generation of high-silica adakites is due to direct melting of the subducted oceanic crust which had been transformed into amphibolites and eclogites during subduction. Adakite granitoids of the Makaryevsky range were derived from partial melting (of about 50 %) of 10 % garnet amphibolite. High saturation of melts by fluids resulted in transformation of ratios of many elements with the appearance of tetradic effect fractionation of the M- and W-type rare earth elements. The scarn- and vein-type gold and copper occurrences are connected with the Makaryevsky range granitoids spatially and paragenetically.

Keywords: gabbro, diorites, tonalites, trondhjemites, leucogranites, high-silica adakites, high-potassic adakites, tetradic effect fractionation of rare earth elements, gold mineralization.

Адакитовые гранитоиды в силу специфики образования часто являются золотогенерирующими. К ярким примерам связи адакитовых гранитоидов и золотого оруденения относятся магматиты и золоточерносланцевое оруденение Бакырчикского месторождения в Казахстане [8]. В Горном Алтае к адакитовому типу гранитоидов относятся кислые дериваты усть-беловского комплекса с ареалами: Башчелакским, Чарышским, Усть-Чарышским, Курьино-Куяганским, Рыбалкинским, Чике-Таманским. Традиционно гра-

нитоиды Макарьевского ареала относились к усть-беловскому комплексу. Для выявления рудогенерирующей и металлогенической роли магматических комплексов чаще всего используются петролого-геохимические критерии. По Макарьевскому ареалу гранитоидов получены новые аналитические данные, которые позволяют совместно с геологическими признаками конкретизировать петрологические особенности, генезис и металлогеническую специфику гранитоидов этого района.



Результаты исследований

К Макарьевскому ареалу гранитоидов относятся массивы Черноключевской, Сосновский, Усть-Осиновский, Шемиловский, Макарьевский и др. В их составе выделяется пять фаз: 1) габброиды; 2) диориты и кварцевые диориты; 3) гранодиориты; 4) трондьемиты; 5) лейкограниты.

Габброиды первой фазы, обычно в виде мелких разрозненных тел, фиксируются по периферии гранитоидных интрузивов Макарьевского ареала. Наиболее крупное такое тело (несколько метров в поперечнике) выявлено бурением в районе Батунковского месторождения вольфрама.

Диориты и кварцевые диориты слагают внутреннюю часть Сосновского, Черноключевского и других интрузивов. Гранодиориты и тоналиты, как правило, занимают также внутренние части интрузивов и являются основной фазой. Центральные части массивов занимают более поздние фазы: граниты, трондьемиты, лейкограниты.

Массивы Макарьевского ареала, вероятно, представляют собой части изначально крупных интрузивных тел, разобщенных внедрившимся позднее Белокурихинским плутоном [5] (рис. 1). По результатам бурения гранитоиды Макарьевского ареала установлены за пределами Белокурихинского надвига под покровом палеоген-четвертичных отложений Бийско-Барнаульской впадины. Контакты Усть-Осиновского и Сосновского массивов с породами рамы непосредственно в обнажениях не наблюдались, однако в плане контакты имеют текущее положение относительно сланцеватости в метаморфитах и слоистости в отложениях нижнего девона. Западный контакт Черноключевского массива, по крайней мере частично, тектонический. Зона разлома выполнена кварцевой жилой мощностью 1,2 м, к западу от которой наблюдаются метаморфиты протерозоя, а восточнее – гнейсовидные гранодиориты. Контактново-метаморфические изменения протерозойских кристаллосланцев и гнейсов в экзоконтактах массивов не проявлены, а контактовый ореол в отложениях девона юго-восточнее Сосновского массива затушеван последующим мощным ороговикованием со стороны Белокурихинского массива.

Характерной особенностью гранитоидов Макарьевского ареала является их гнейсовидность. Частично она обусловлена проявлением мощного динамометаморфизма в восточной части Белокурихинского блока. Гнейсовидные бластокатаклазиты Сосновского массива по облику приближаются к протерозойским гнейсам, в связи с чем некоторые исследователи рассматривали их в составе метаморфических образований [2]. Однако на соседней к востоку площади (район р. Даниловка) установлено, что гнейсовидные, плейчатые разности и массивные тоналиты имеют один и тот же химический состав, их возраст (349 и 353 млн лет

соответственно U/Pb-методом по цирконам) резко отличается от возраста метаморфитов [1]. Гнейсовидность гранитоидов Черноключевского и Усть-Осиновского массивов первично магматическая. В указанных массивах по мере удаления от контактов наблюдаются постепенные переходы от гнейсовидно-полосчатых гранодиоритов, тоналитов эндоконтактных частей интрузивов к массивным меланогранитам. При этом в гранитоидах с директивными текстурами не обнаружено заметного катаклаза и милонитизации. Гнейсовидные гранитоиды характеризуются плитчатой отдельностью; ориентировка плитчатости и гнейсовидности совпадает. В массивных гранитах преобладает крупноглыбовая матрацевидная отдельность. По особенностям минерального состава (слабо железистый биотит ($F = 52-60$) нерешетчатый триклинный ортоклаз ($2V = 70-74^\circ$), зональный плагиоклаз, обыкновенная роговая обманка) и петрохимии массивные и гнейсовидные гранитоиды имеют большое сходство с одноименными разностями Бащелакского ареала и других участков распространения пород усть-беловского комплекса.

Массивам Макарьевского ареала не свойственны дайковые породы.

Гранитоиды ареала формировались в мезоабиссальной обстановке. На это указывают среднекрупнозернистые монцонитовые и пойкилитовые структуры, мощные ореолы ороговикования, отсутствие зон закалки и значения палеотемператур минеральных равновесий. Уровень эрозионного среза варьирует у разных массивов. Максимально эродированы гранитоиды Макарьевского ареала, в пределах которого почти полностью отсутствуют жильные образования. Отличительная черта массивов этого ареала, в отличие от остальных массивов усть-беловского комплекса, – значительный эрозионный срез, связанный с особенностями эксгумации и резкого подъема с расчленением на несколько массивов под влиянием интродуцированного позднее Осокинского штока белокурихинского комплекса. Характерной особенностью диоритов, тоналитов и гранодиоритов являются многочисленные меланократовые включения, указывающие на процесс смешения базальтоидной магмы с более кислой.

Вещественный состав гранитоидов, форма и размеры массивов, характер контактовых ореолов типичны для тоналит-гранодиоритовой формации. Относительно высокие значения $^{87}\text{Sr}/\text{Sr}^{86}$ (0,711–0,712) в гранитоидах Макарьевского ареала [2] указывают на широкую ассимиляцию корового материала базитовой магмой. Геохимическая специализация гранитоидов усть-беловского комплекса – V, Co, Sc, ведущая металлогеническая – золотая, медно-молибден-золотая. Гранитоиды ареала представляли собой рудовмещающую среду при формировании месторождений вольфрама, парагенетически и пространственно связанных с лейкогранитами белокурихинского комплекса.

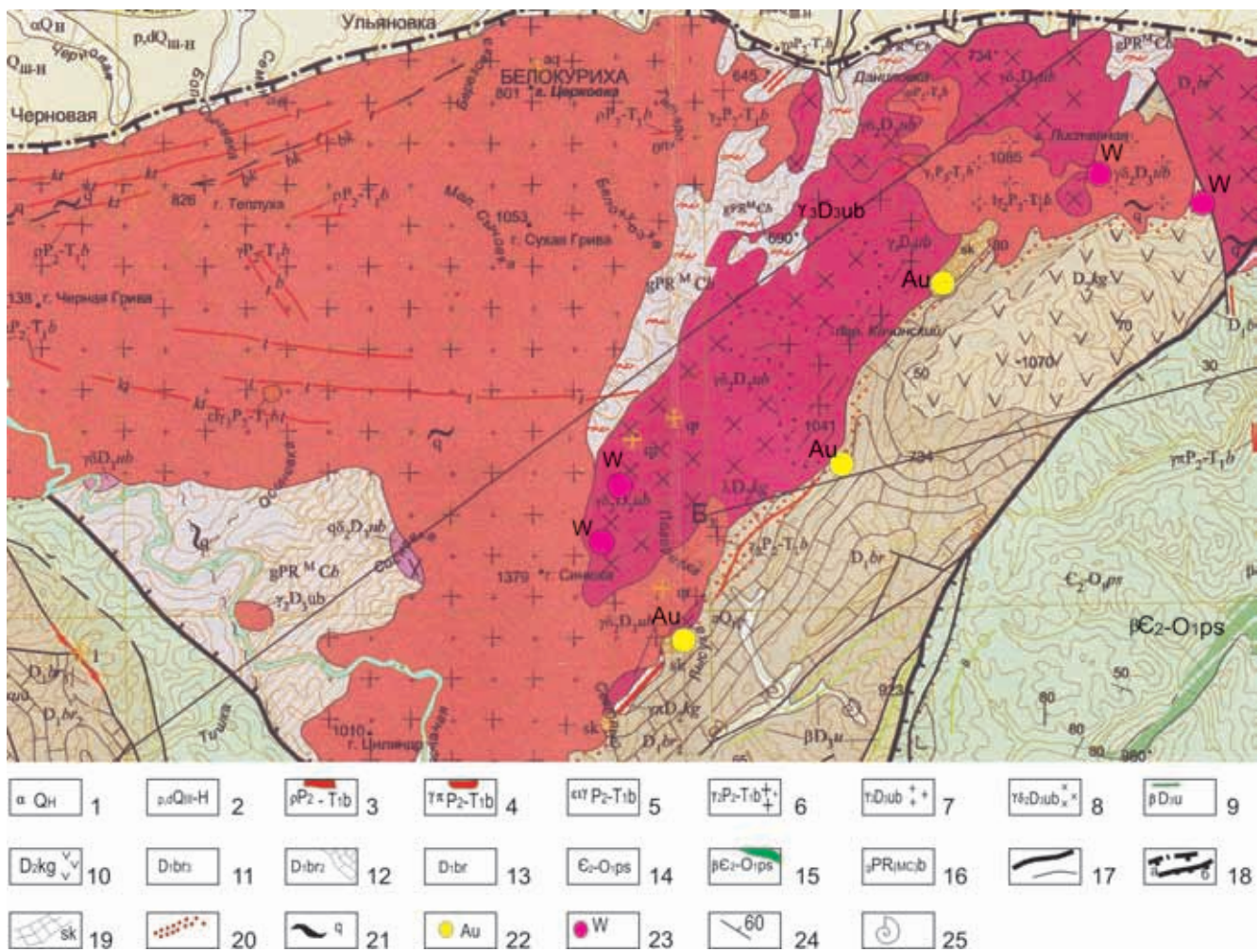


Рис. 1. Схематическая карта полезных ископаемых Макарьевского ареала (по В. А. Кривчикову с добавлениями автора) Отложения пойм: 1 – аллювиальные, 2 – пролювиальные и делювиальные; белокурихинский комплекс: 3 – дайки аплитов; 4 – дайки гранит-порфиров; 5 – умеренно-щелочные лейкограниты биотитовые и двуслюдяные третьей фазы; 6 – граниты порфировидные главной (второй) фазы; магматиты Макарьевского ареала: 7 – гранодиориты третьей фазы; 8 – диориты, кварцевые диориты второй фазы; 9 – дайки долеритов, габбро-долеритов урскульского комплекса; 10 – лавы андезитов, андезибазальтов, базальтов, дацитов, риолитов, туфов и туфолов среднего и кислого составов куяганской свиты; барагашская свита: 11 – песчаники, алевролиты, известняки верхней подсвиты; 12 – известняки биогермные средней подсвиты; 13 – пестроцветные песчаники, алевролиты, известняки, гравелиты, конгломераты нижней подсвиты; песчанский комплекс: 14 – пестроцветные песчаники, алевролиты, филлиты, туффиты, гравелиты песчанской толщи; 15 – силлы долеритов; 16 – гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты белокурихинского полиметаморфического комплекса эпидот-амфиболитовой фации; тектонические нарушения: 17 – сбросы, взбросы, сдвиги; 18 – надвиги: а – под покровом четвертичных образований, б – в коренном залегании; 19 – скарны; 20 – роговики; 21 – кварцевые жилы; 22 – проявления золота; 23 – месторождения вольфрама; 24 – элементы залегания пород; 25 – места находок фауны

Раннекаменноугольный возраст комплекса устанавливается на основании следующих данных: 1) гранитоиды метаморфизуют живецкие дайки куяганского комплекса; 2) данные радиологии уран-свинцовым методом показывают 349–353 млн лет (Сосновский массив) и 353±12 млн лет (Макарьевский массив). Для сравнения: гранитоиды Верхнебашлаковского массива к югу от Макарьевского ареала, по данным С. П. Шокальского (U/Pb-метод по цирконам), имеют возраст 371±15 млн лет и прорываются гранитами боровлянского комплекса с возрастом 362±8 млн лет (тот же метод). Вероятно, значительное омоложение возраста гранитоидов Макарьев-

ского ареала в отличие от времени формирования аналогичных образований петротипического Башлаковского ареала, связано с воздействием магматитов белокурихинского комплекса.

Представительные анализы пород Макарьевского ареала сведены в табл. 1.

Химический состав пород Макарьевского ареала имеет специфические особенности в отличие от других ареалов распространения пород усть-беловского комплекса. Эта специфика обусловлена сильной ассимиляцией корового материала и последующим влиянием при внедрении магматитов белокурихинского плутона. Особенно это заметно



Таблица 1

Представительные анализы интрузивных пород Макарьевского ареала (оксиды в мас. %, элементы в г/т)

Оксид, элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	50,1	51,2	54,3	57,2	65,5	64,9	69,9	75,1	75,3	75,2
TiO ₂	0,95	0,92	0,88	0,9	0,51	0,49	0,43	0,11	0,15	0,14
Al ₂ O ₃	15,6	15,5	15,8	17,3	16,1	16,24	15,6	12,8	12,93	12,95
Fe ₂ O _{3t}	10,1	9,9	9,31	8,42	5,45	5,15	5,0	1,2	1,3	1,25
MnO	0,21	0,2	0,20	0,17	0,12	0,11	0,12	0,05	0,06	0,07
MgO	8,3	7,9	6,6	3,9	2,1	1,97	1,91	0,17	0,21	0,2
CaO	9,1	9,0	8,9	7,1	4,7	4,6	4,4	0,76	0,8	0,83
Na ₂ O	2,6	2,7	2,8	3,1	3,15	3,7	4,9	2,9	2,8	3,0
K ₂ O	0,9	0,85	0,91	1,45	2,05	2,04	1,95	5,5	5,4	5,3
P ₂ O ₅	0,18	0,16	0,16	0,17	0,13	0,15	0,14	0,04	0,05	0,06
Σ	99,42	99,6	99,46	99,71	99,81	99,35	100,51	99,6	99,36	99,5
Sc	34,9	34,78	15,1	13,3	12,9	9,64	9,7	9,3	9,5	9,2
V	55	50	52	40	40	50	40	45	42	43
Cr	40,1	37,5	38,3	24,8	26,0	34,1	30,2	23,1	21,5	20,7
Co	7,3	7,03	7,2	6,5	7,3	3,63	4,3	3,4	3,2	3,1
Ni	11,6	11,1	11,3	6,7	8,0	8,47	9,5	9,1	9,0	8,8
Li	9	10	10	17	22	25	27	4	15	10
Cs	1,1	1,3	1,2	2,1	2,6	2,8	3,0	3,6	4,8	4,1
Be	0,7	0,9	0,8	0,8	2,1	2,1	2,5	0,8	2,1	2,0
Rb	18	19	17	19	67	55	70	125	130	128
Sr	290	285	330	315	440	430	436	90	94	93
Y	22,6	22,9	23,4	26,8	14,8	15,1	15,7	10,5	11,2	11,4
Zr	45	47	49	62	115	98	102	65	70	71
Nb	5,6	5,7	3,3	7,4	8,3	8,7	8,3	6,4	6,2	6,3
Ba	367	365	355	515	941	705	703	180	175	182
La	23,3	23,0	21,4	22,1	29,1	29,8	42,1	23,0	22,0	24,2
Ce	31,2	31,0	29,0	31,1	32,3	21,0	39,2	20,6	20,1	22,6
Pr	5,1	5,0	3,1	4,4	4,0	3,2	4,6	7,5	4,8	8,5
Nd	13,4	13,1	12,0	13,6	13,1	10,1	19,0	6,0	6,6	6,9
Sm	4,1	4,0	4,3	4,4	3,5	2,4	3,7	0,98	1,2	1,01
Eu	1,3	1,2	1,1	1,1	0,95	0,49	0,86	0,23	0,28	0,21
Gd	2,5	2,4	0,73	2,4	2,3	0,33	0,93	1,15	2,1	1,25
Tb	0,7	0,6	2,9	0,75	0,49	2,6	2,45	0,15	0,2	0,18
Dy	3,6	3,5	0,58	2,95	2,6	2,47	2,4	1,9	2,0	2,4
Ho	1,0	1,2	0,92	0,97	0,94	0,9	0,87	0,7	0,8	0,75
Er	2,6	2,5	2,3	2,4	2,1	2,2	2,3	1,9	2,0	1,95
Tm	0,5	0,6	0,42	0,62	0,38	0,3	0,32	0,14	0,15	0,16
Yb	1,9	2,5	2,5	2,55	1,4	1,5	1,4	0,9	1,1	0,96
Lu	0,4	0,3	0,5	0,5	0,3	0,25	0,24	0,16	0,18	0,15
Hf	3,0	3,1	3,1	2,3	3,2	3,3	3,4	2,6	2,7	2,5
Ta	0,5	0,51	0,48	0,43	0,49	0,63	0,7	0,9	1,2	0,85
Th	2,2	2,1	4,8	4,5	5,8	6,4	7,2	6,8	7,7	7,8
U	0,8	0,7	1,2	1,3	1,7	1,8	1,6	1,9	1,8	3,9
(La/Yb) _N	8,1	6,1	5,66	5,7	13,7	13,1	19,8	16,86	13,2	16,7
U/Th	0,36	0,33	0,25	0,29	0,29	0,28	0,22	0,28	0,23	0,5
Ba/Th	114,7	166,8	173,8	73,9	162,2	110,1	97,6	26,5	22,7	23,3
Ba/La	15,8	15,7	16,6	23,3	32,3	23,6	16,7	7,8	7,95	7,5
Sm/Th	1,86	1,86	0,9	0,98	0,6	0,38	0,51	0,14	0,16	0,13

Примечание. Fe₂O_{3t} – суммарное железо; значения РЗЭ нормированы по хондриту по [9]. Породы Макарьевского ареала: 1–2 – габбро, 3–4 – диориты, 5–6 – гранодиориты, 7 – трондьемит, 8–10 – лейкограниты.



в соотношении натрия и калия в породах, а заключительные фазы лейкогранитов Макарьевского ареала характеризуются резким преобладанием калия над натрием.

Нормированные отношения $(La/Yb)_N$ к хондриту варьируют от 5,66 до 19,8, что указывает на дифференцированный тип распределения РЗЭ. Наиболее высокие отношения свойственны гранодиоритам, трондъемитам и лейкогранитам. Отношения U/Th во всех породных типах менее 1; это свидетельствует об их природе, не измененной вторичными наложенными процессами.

По комплексу признаков кислые разности пород Макарьевского ареала следует относить к высококалиевым адакитовым гранитоидам (АД), к которым, как известно, относятся специфические кислые интрузивные породы, имеющие сходство с эффузивными адакитами: очень низкие концентрации иттрия (менее 18 г/т), иттербия (менее 1,8 г/т), повышенные содержания ванадия и хрома, высокие нормированные к хондриту отношения лантана к иттербию (более 8–10), указывающие на сильно дифференцированный тип распределения РЗЭ в породах. В гранодиоритах, трондъемитах и лейкогранитах Макарьевского ареала концентрации иттрия варьируют от 10,5 до 15,1, иттербия от 0,9 до 1,5, отношения $(La/Yb)_N$ от 13,1 до 19,8. Кроме повышенных содержаний ванадия и хрома, в породных типах ареала отмечаются повышенные концентрации калия, скандия и никеля.

По соотношению Sr/Y–Y кислые породные типы Макарьевского ареала попадают в поле адакитов (рис. 2) [12].

На диаграмме $(SiO_2/MgO) \cdot 100 - K/Rb - Sr$ фигуративные точки кислых разностей пород попадают в поле высококремнистых адакитов (рис. 3).

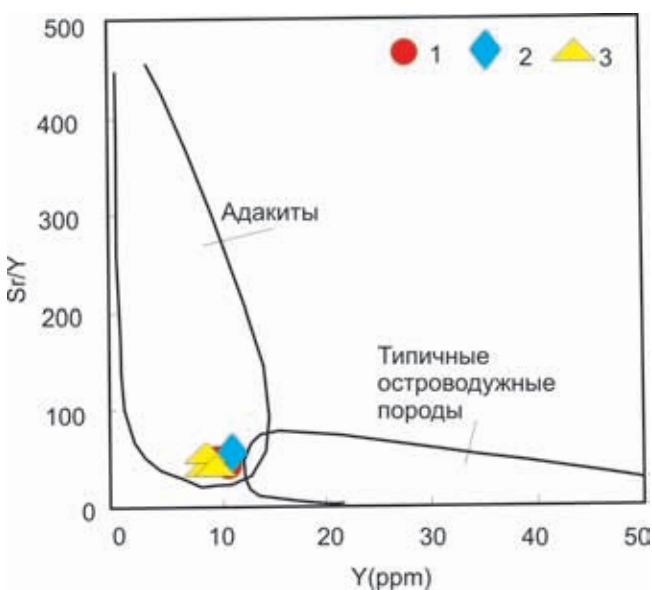


Рис. 2. Диаграмма Sr/Y–Y по [10] для пород Макарьевского ареала

1 – гранодиориты; 2 – трондъемиты; 3 – лейкограниты

Соотношение нормированных отношений $(La/Yb)_N/Yb_N$ показывает, что породные типы адакитовых гранитоидов Макарьевского ареала образуют тренд от нормальных низкоглиноземистых тоналит-трондъемит-дацитов (гранодиориты и тоналиты) к адакитовым высокоглиноземистым тоналит-трондъемит-дацитам (трондъемиты и лейкограниты) с понижением степени частичного плавления до 10 % гранатового амфиболита (рис. 4). Степень частичного плавления родоначального гранатового амфиболита превышала 50 % для гранодиоритов, а для трондъемитов и лейкогранитов была менее 50 %.

Нормированное распределение РЗЭ в породах приведено на рис. 5. Для лейкогранитов отчетливо

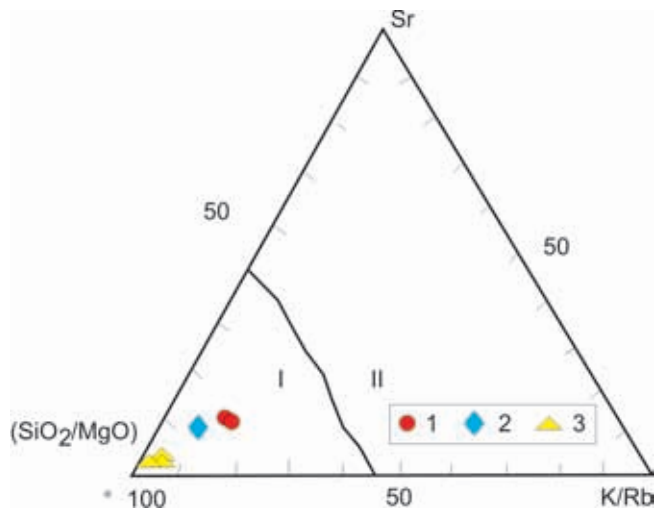


Рис. 3. Диаграмма Sr – K/Rb – $(SiO_2/MgO) \cdot 100$ по [19] для адакитовых гранитоидов Макарьевского ареала

Поля адакитов: I – высококремнистых, II – низкокремнистых. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2

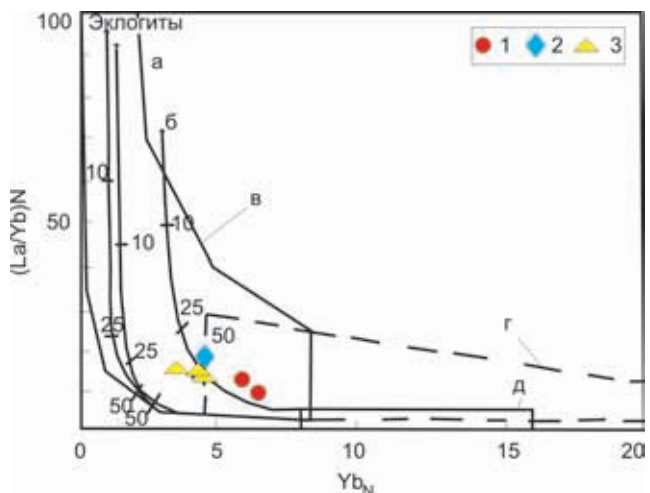


Рис. 4. Диаграмма $(La/Yb)_N - Yb_N$ по [13, 21] для гранитоидов Макарьевского ареала: а – 25 % гранатового амфиболита; б – 10 % гранатового амфиболита; в – адакиты высоко-АI тоналит-трондъемит-дацитовые; г – нормальные андезиты и низко-АI тоналит-трондъемит-дацитовые; д – океанические базальты из офиолитового блока пояса Мина-Лью по [21]

Усл. обозн. см. на рис. 2

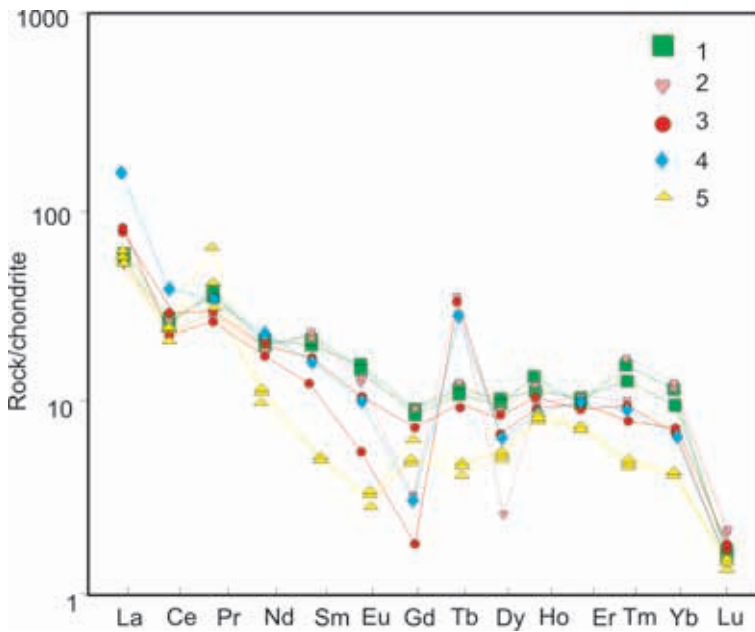


Рис. 5. Спайдер-диаграмма распределения РЗЭ для пород Макарьевского ареала (содержания нормированы относительно хондрита по [9])
1 – габбро; 2 – диориты; 3 – гранодиориты; 4 – трондьемит; 5 – лейкограниты

устанавливается европейский минимум, для всех остальных пород он не просматривается. Формы кривых распределения РЗЭ имеют слабо выраженные вогнутые и выпуклые поверхности, свидетельствующие о проявлении разных типов тетрадного эффекта распределения РЗЭ.

Математические расчеты по [15] показали, что в породах Макарьевского ареала действительно проявлялись два типа тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ: М-тип со значимыми величинами более 1,1 и W-тип со значимыми величинами менее 0,9 [20].

Следует указать, что оба типа отмечаются в породах от диоритов до лейкогранитов, т. е. во всех дериватах смешанного типа и заключительных фазах с преобладанием адакитовых меток, определяемых по геохимическим данным (табл. 2). Одновременное проявление двух типов ТЭФ РЗЭ обусловлено аномальными параметрами флюидного режима магматогенных флюидов и значительной активностью таких летучих компонентов, как F, Cl,

CO₂, H₂O и др. [7]. Наиболее высокие значения ТЭФ РЗЭ М-типа в гранодиоритах и трондьемитах.

Показательны отношения Zr/Hf к ТЭФ РЗЭ. На диаграмме просматриваются два тренда: 1) увеличения значений ТЭФ РЗЭ М-типа с увеличением отношений Zr/Hf; 2) уменьшения ТЭФ РЗЭ W-типа с увеличением отношений Zr/Hf (рис. 6). Эти тренды указывают на сильно дифференцированный тип распределения элементов в породах.

В табл. 2 приведены также показательные отношения, которые указывают значительные их вариации относительно хондритовых. Часть отношений ниже хондритовых (Y/Ho, Zr/Hf, La/Nb), часть – выше (La/Ta, Sr/Eu, Sr/Y); Eu/Eu* и выше, и ниже. Отрицательные отношения Eu/Eu* характерны для заключительных дериватов.

Значительная трансформация концентраций элементов и их соотношений в породах подтверждается также на диаграмме соотношений Y/Ho и Zr/Hf (рис. 7). Видно, что фигуративные точки составов пород локализируются за пределами поля

Таблица 2

Отношения элементов и значения тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ в адакитовых гранитоидах Макарьевского ареала

Отношения элементов и значения ТЭФ в породах	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Отношения в хондритах
Y/Ho	22,6	19,0	25,4	27,6	15,7	16,8	18,0	15,0	14,0	15,2	29,0
Zr/Hf	15,0	15,2	15,8	26,9	35,9	29,7	30,0	25,0	25,9	28,4	36,0
La/Nb	4,1	4,0	6,5	2,9	3,5	3,4	5,1	3,6	3,5	3,8	30,75
La/Ta	46,6	45,0	44,6	51,4	59,4	47,3	60,1	25,6	18,3	28,5	17,57
Sr/Eu	223	238	300	286	463	877	507	391	336	443	100,5
Eu/Eu*	1,16	1,11	1,21	1,14	0,97	0,99	1,05	0,67	0,54	0,58	0,32
Sr/Y	12,8	12,4	14,1	11,7	29,7	28,5	27,8	8,6	8,4	8,2	4,62
TE _{1,3}	1,04	0,97	1,3	1,01	0,83	2,87	1,8	1,07	0,84	1,11	–

Примечание. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [15]; Eu* = (Sm_N + Gd_N)/2. Значения в хондритах приняты по [9]. Породы Макарьевского ареала: 1–2 – габбро, 3–4 – диориты, 5–6 – гранодиориты, 7 – трондьемит, 8–10 – лейкограниты.

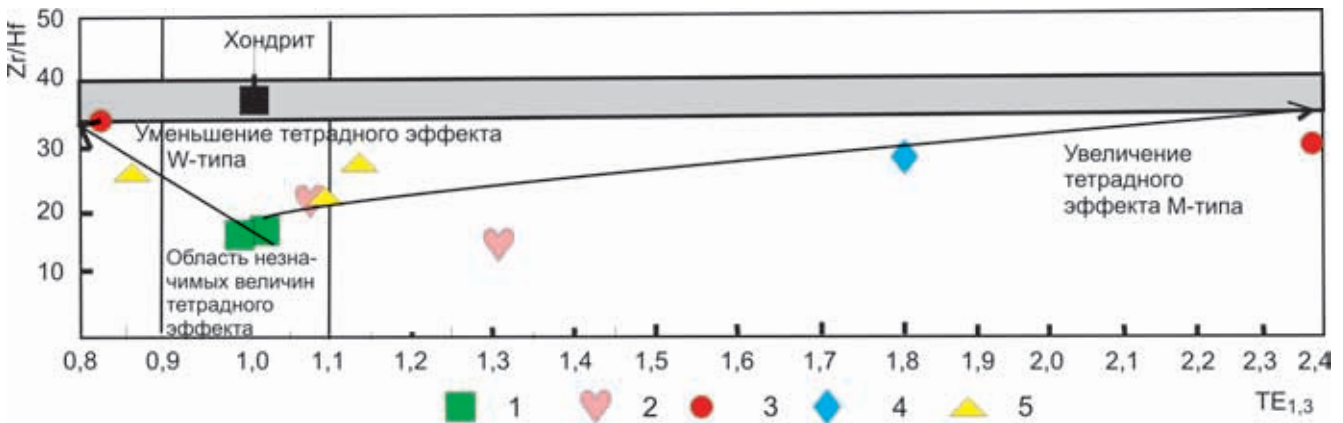


Рис. 6. Диаграмма соотношений Zr/Hf – TE_{1,3} по [16] с добавлениями автора для пород Макарьевского ареала 1 – габбро; 2 – диориты; 3 – гранодиориты; 4 – трондьемит; 5 – лейкограниты

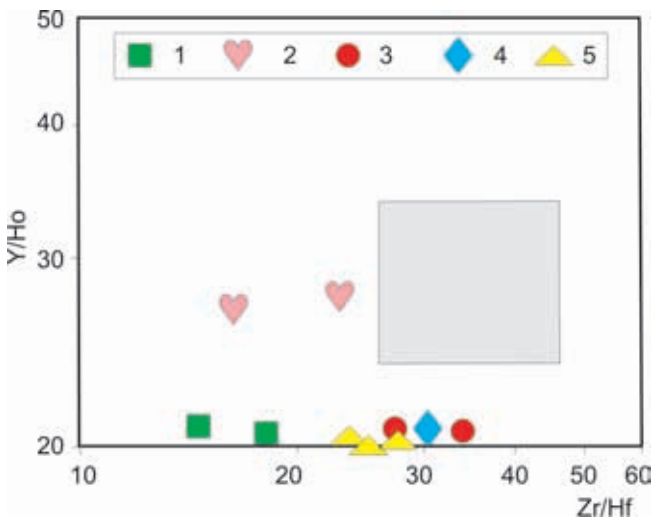


Рис. 7. Диаграмма Zr/Hf – Y/No для пород Макарьевского ареала (серое поле НАРАС (CHArge-and-Radius-Controlled) на диаграмме выделено по [11])

Усл. обозн. см. на рис. 5

CHARAC (CHArge-and-Radius-Controlled – заряд-радиус-контролируемые соотношения) [11], указывая, что элементы с одинаковым ионным радиусом и зарядом (пары Y-Но и Zr-Hf) экстремально не когерентны в расплавах и ранних, и поздних фаз Макарьевского ареала, что связано с аномальной флюидонасыщенностью родоначальных расплавов [3].

Интерпретация результатов

Характер зональности интрузивов интерпретируется как результат химической дифференциации и скорости поступления последовательных фаз из глубинного очага. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие поступления не успевают кристаллизоваться и более поздние фазы их легко прорывают и располагаются в центре plutонов, формируя нормальную зональность. Такому сценарию отвечает формирование интрузивов Макарьевского ареала. Магматиты последнего были омоложены, вероятно, в результате внедрения пород Белокурихинского plutона, а значительная контаминация коровым материалом привела

к изменению химизма пород как по петрогенным компонентам, так и по микроэлементам.

Высокие отношения Ba/Th (>114) и Ba/La (>15), а также низкие содержания Th и Th/Yb, Sm/Th (1,86) в габброидах подтверждают, что мафические породы Макарьевского ареала, вероятно, были генерированы частичным плавлением слэба, представленного флюид-метасоматизированным мантийным перидотитом, как это было установлено для раннепалеозойских plutонов на северо-западе Китайского Тянь-Шаня, геохимические характеристики которых близки к таковым габброидов Макарьевского ареала [13, 14]. Диоритоидные разности Макарьевского ареала, вероятно, представляют собой смешанные образования базальтоидов и адакитовых расплавов, а гранодиориты, трондьемиты и лейкограниты заключительных фаз – в большей степени дериваты адакитовых расплавов, в меньшей – смешанного источника.

Генерация высококремнистых и высококальциевых адакитов связана с прямым плавлением субдуцируемой океанической коры, преобразованной в ходе погружения в амфиболиты или эклогиты [11, 16–18]. Для адакитовых гранитоидов Макарьевского ареала реставрируется высокая степень частичного плавления 10 % гранатового амфиболита.

Высокая флюидонасыщенность расплавов усть-беловского комплекса (Башчелак, Чике-Таман, Мурзинка, Эдиган) выдерживается повсеместно на территории Горного Алтая [4, 6]. Она свойственна и глубинному очагу Макарьевского ареала, что вызывало значительные трансформации в соотношениях различных элементов вплоть до проявления: 1) не заряд-радиус-контролируемого поведения элементов в расплавах; 2) двух типов ТЭФ РЗЭ (М и W). Ранее нами установлено, что среди ареалов гранитоидов усть-беловского комплекса выделяются два подтипа: сильно контаминированный коровым материалом, сопровождающийся оруденением золота и меди, и слабо контаминированный без заметного оруденения [6].

Указанные особенности поведения химических элементов в породах имеют отношение к рудонос-



ности гранитоидов Макарьевского ареала. Пространственно и парагенетически с Сосновским массивом гранодиоритов и тоналитов усть-беловского комплекса связано разобобщенное оруденение золота, локализованное в гранитоидах (1–1,8 г/т золота) и в скарнированных породах барагашской свиты в экзоконтакте массива (0,5 г/т золота в ассоциации 0,001–0,02 % вольфрама). Эти проявления сопровождаются шлиховыми потоками с единичными знаками золота. Здесь же в экзоконтактовой части массива известна непромышленная *россыпь р. Погорелка*, разведанная в 1851 и 1890 гг. на протяжении 0,5 км. Содержание золота на «пески» от знаков до 0,76 г/м³. Восточнее с гранодиоритами усть-беловского комплекса Щемиловского массива пространственно и, вероятно, парагенетически совпадают аллювиальные долинны *россыпи р. Щемиловка* (Бол. Щемиловка) и *р. Каменка*. Первая разрабатывалась в XX в. Она считается недоразведанной. Золото крупное, плохо окатанное. Запасы категорий В+С₁ 5,5 кг. *Россыпь р. Каменка* разведывалась и частично эксплуатировалась в 1937–1938 гг. Максимальное содержание золота в шурфах до 2 г/м³.

В южной части Батунковского вольфрамового месторождения вблизи контакта гранодиоритов и тоналитов в зоне окварцевания с обильным пиритом по терригенным породам куйганской свиты содержания золота от 0,9 до 3,5 г/т. На Лысухинском медно-золото-скарновом проявлении в контакте с тоналитами (Сосновский массив) концентрация золота 0,5–2,1 г/т, серебра – 15–45 г/т.

Выводы

Гранитоиды Макарьевского ареала по комплексу признаков относятся к адакитовому типу (высококалийному и высококремнистому). Влияние магматитов белокурихинского комплекса и значительная контаминация коровым материалом привели к омоложению пород Макарьевского ареала в сравнении с возрастом массивов других ареалов усть-беловского комплекса и к изменению химизма пород.

Их формирование связано с плавлением 10 % гранатового амфиболита субдуцируемой океанической коры. Степень частичного плавления составляла 50 % и менее. В породах проявлены два типа ТЭФ РЗЭ и не заряд-радиус-контролируемое поведение многих химических элементов в расплавах. Высокая флюидонасыщенность магмотогенных расплавов и особенности трансформации химических элементов определяли рудогенерирующую способность глубинного магматического очага. С гранодиоритами и тоналитами некоторых массивов Макарьевского ареала пространственно и парагенетически связано жильное золото-сульфидно-кварцевое и скарновое медно-золоторудное оруденение.

Возможно, описанный магматизм Макарьевского ареала следует выделять в самостоятельный магматический комплекс, возраст которого рез-

ко отличается от петротипического массива усть-беловского комплекса, как и химический состав и специфика генезиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Владимиров, А. Г.** Изотопное датирование рудоносных магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области для Госгеолкарты-1000 [Текст] / А. Г. Владимиров, С. Н. Руднев. – Новосибирск, 2002. – 307 с.
2. **Владимиров, А. Г.** Позднепалеозойский – раннемезозойский гранитоидный магматизм и проблема рифтового этапа тектогенеза в Горном Алтае [Текст] / А. Г. Владимиров, С. П. Шокальский, А. П. Пономарева // Геологическое строение и полезные ископаемые западной части Алтае-Саянской горной области. – Новокузнецк, 1995. – С. 186–189.
3. **Гусев, А. И.** Анорогенные гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим [Текст] / А. И. Гусев, Н. И. Гусев. – Бийск : Изд-во АГАО, 2014. – 202 с.
4. **Гусев, А. И.** Критерии продуктивных магматических комплексов Алтайского региона на золотое оруденение [Текст] / А. И. Гусев, Е. М. Табакаева. – Бийск : Изд-во АГАО, 2014. – 145 с.
5. **Гусев, А. И.** Минерагения и полезные ископаемые Алтайского края [Текст] / А. И. Гусев. – Бийск : Изд-во АГАО, 2011. – 365 с.
6. **Гусев, А. И.** О двух подтипах гранитоидов усть-беловского комплекса Горного Алтая [Текст] / А. И. Гусев // Алтай: экология и природопользование : тр. XIII Российско-Монгольской конференции молодых ученых и студентов. – Бийск : Изд-во АГАО, 2015. – С. 68–74.
7. **Гусев, А. И.** Петрология адакитовых гранитоидов [Текст] / А. И. Гусев. – М. : Изд-во РАН, 2014. – 152 с.
8. **Коробейников, А. Ф.** Адакитовые гранитоиды Калбы: петрология и рудоносность [Текст] / А. Ф. Коробейников, А. И. Гусев, Г. Г. Русанов // Изв. ТПУ. – 2010. – Т. 316, № 1. – С. 31–38.
9. **Anders, E.** Abundances of the elements: meteoric and solar [Text] / E. Anders, N. Greevesse // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1989. – Vol. 53. – P. 197–214.
10. **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.
11. **Bau, M.** Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids [Text] / M. Bau, P. Dulski // Contrib. Mineral. Petrol. – 1995. – Vol. 119. – P. 213–223.
12. **Defant, M. J.** Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [Text] / M. J. Defant, M. S. Drummond // Nature. – 1990. – Vol. 347. – N 4. – P. 662–665.
13. **Drummond, M. S.** A model for trondhjemitonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [Text] / M. J. De-



fant, M. S. Drummond, M. J. Defant // *J. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95. – P. 21503–21521.

14. **Geochemistry**, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes od early Paleozoic plutons in the northwestern Chinese Tianshan: Petrogenesis and geological implications [Text] / Z. Huang, X. Long, A. Kröner [et al.] // *Lithos.* – 2013. – Vol. 182. – P. 48–66.

15. **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. 49–71.

16. **Jahn, B.** Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China [Text] / B. Jahn, F. Wu, R. Capdevila // *Lithos.* – 2001. – Vol. 59. – P. 171–198.

17. **Kay, R. W.** Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust [Text] / R. W. Kay // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* – 1978. – Vol. 4. – P. 117–132.

18. **Martin, H.** Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids [Text] / H. Martin // *Lithos.* – 1999. – Vol. 46. – P. 411–429.

19. **Martin, H.** An overview of adakite, tonalite-trondjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution [Text] / H. Martin, R. H. Smithies, R. Rapp // *Lithos.* – 2005. – Vol. 79. – P. 1–24.

20. **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 [Text] / T. Monecke, U. Kempe, J. Monecke [et al.] // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 2002. – Vol. 66, N 7. – P. 1185–1196.

21. **The Discovery** of the High Depleted N-MORB-type Volcanic Rocks: New Evidence for Paleo Ocean of Mian-Lue [Text] / J.-F. Xu, X. Y. Yu, X.-H. Li [et al.] // *Chinese Science Bulletin.* – 1998. – Vol. 43, N 6. – P. 510–514.

REFERENCES

1. Vladimirov A.G., Rudnev S.N. *Izotopnoe datirovanie rudonosnykh magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti dlya Gosgeolkarty-1000* [Isotope dating of ore-bearing magmatic and metamorphic complexes of the Altai-Sayan folded region for the Gosgeolkarta-1000]. Novosibirsk, 2002. 307 p. (In Russ.).

2. Vladimirov A.G., Shokalskiy S.P., Ponomareva A.P. [The Paleozoic – Early Mesozoic granitoid magmatism and the rift tectogenesis stage in Gorny Altai]. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye zapadnoy chasti Altae-Sayanskoy gornoy oblasti* [Geological structure and mineral resources of the western Altai-Sayan mountain region]. Novokuznetsk, 1995, pp. 186–189. (In Russ.).

3. Gusev A.I., Gusev N.I. *Anorogennyye granitoidy: petrologiya, geokhimiya, flyuidnyy rezhim* [Non-orogenic granitoids: Petrology, geochemistry, fluid regime]. Biysk, AGAO Publ., 2014. 202 p. (In Russ.).

4. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. *Kriterii produktivnykh magmaticheskikh kompleksov Altayskogo regiona na zolotoe orudnenie* [Gold mineralization criteria of producing magmatic complexes in the Altai Region]. Biysk, AGAO Publ., 2014. 145 p. (In Russ.).

5. Gusev A.I. *Minerageniya i poleznye iskopaemye Altayskogo kraya* [Minerageny and mineral resources of the Altai Territory]. Biysk, AGAO Publ., 2011. 365 p. (In Russ.).

6. Gusev A.I. [Two subtypes of granitoids of the Ust'-Belovsky complex in Gorny Altai]. *Altay: ekologiya i prirodopol'zovanie. Trudy XIII Rossiysko-Mongol'skoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov* [Altai: Ecology and natural resource management. Proc. XIII Russian-Mongolian conference of young scientists and students]. Biysk, AGAO Publ., 2015, pp. 68–74. (In Russ.).

7. Gusev, A.I. *Petrologiya adakitovykh granitoidov* [Petrology of adakite granitoids]. Moscow, RAE Publ., 2014. 152 p. (In Russ.).

8. Korobeynikov A.F., Gusev A.I., Rusanov G.G. [Adakite granitoids of Kalba: Petrology and ore-bearing potential]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Proc. Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 31–38. (In Russ.).

9. Anders E., Greevesse N. Abundences of the elements: meteoric and solar. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.

10. Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 605–626.

11. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1995, vol. 119, pp. 213–223.

12. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, vol. 347, no. 4, pp. 662–665.

13. Drummond M.S., Defant M.J., Defant M.J. A model for trondjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 1990, vol. 95, pp. 21503–21521.

14. Huang Z., Long X., Kröner A., et al. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes od early Paleozoic plutons in the northwestern Chinese Tianshan: Petrogenesis and geological implications. *Lithos*, 2013, vol. 182, pp. 48–66.

15. 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. et Cosmochim. Acta*, 1999, vol. 63, no. 3/4, pp. 49–71.

16. Jahn B., Wu F., Capdevila R. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 2001, vol. 59, pp. 171–198.



17. Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1978, vol. 4, pp. 117–132.

18. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 411–429.

19. Martin H., Smithies R.H., Rapp R. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 2005, vol. 79, pp. 1–24.

20. Monecke T., Kempe U., Monecke T., et al. 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. et Cosmochim. Acta*, 2002, vol. 66, no. 7, pp. 1185–1196.

21. Xu J.-F., Yu X.Y., Li X.-H., et al. The Discovery of the High Depleted N-MORB-type Volcanic Rocks: New Evidence for Paleo Ocean of Mian-Lue. *Chinese Science Bulletin*, 1998, vol. 43, no. 6, pp. 510–514.

© А. И. Гусев, 2015

ГУСЕВ Анатолий Иванович, Алтайская государственная академия образования им. В. М. Шукшина, Бийск, проф., д. г.-м. н. E-mail: anzerg@mail.ru
GUSEV Anatoly, DSc, Prof., Altai State Educational Academy named after V. M. Shukshin, Biysk, Russia. E-mail: anzerg@mail.ru