

УДК: 552.3:550.4:550.42:550.93

ПЕТРОЛОГИЯ И ЗОЛОТОНОСНОСТЬ АДАКИТОВЫХ ГРАНИТОИДОВ УСТЬ-БЕЛОВСКОГО КОМПЛЕКСА МАКАРЬЕВСКОГО АРЕАЛА ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. географии и экологии
естественно-географического факультета Алтайской государственной
академии образования им. В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск,
ул. Советская, д. 11. E-mail: anzerg@mail.ru

Коробейников Александр Феопенович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. геологии и разведки полезных
ископаемых Института природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lev@tpu.ru

Актуальность исследования вызвана необходимостью изучения петрологических и геохимических особенностей габбро-гранитоидных массивов Макарьевского ареала, с которыми пространственно связаны проявления золота. Целью исследования является изучение геологических, петрологических и геохимических признаков всех породных типов усть-беловского комплекса ареала с использованием канонических классификационных и экспериментальных диаграмм, позволяющих решать генетические проблемы. Определение редких и рассеянных элементов в породах выполнено методом индуктивно-связанной плазмы на масс-спектрометре «ОРТИМА-4300». Абсолютный возраст пород определен U-Pb-методом SHRIMP II по циркону. Рассмотрены геологические особенности, петрология, геохимия, абсолютный возраст и генезис гранитоидов Макарьевского ареала усть-беловского комплекса Горного Алтая. В его состав входят Черноключевской, Сосновский, Усть-Осиновский, Щемиловский, Макарьевский и другие массивы. Выделены 5 фаз, включающих габброиды, диориты, тоналиты, трондjemиты, лейкограниты. Приведен уран-свинцовый возраст гранитоидов, отвечающий интервалу $349\div 353\pm 12$ млн лет. Встроении массивов отмечается прямая зональность с локализацией ранних фаз по периферии, а более поздних – в центре. Гранитоиды разгнейсованы. По петрогеохимическим данным кислые разности показывают признаки высококремнистых адакитовых гранитоидов. Габброиды ранней фазы Макарьевского ареала, вероятно, были генерированы частичным плавлением слэба, представленного флюид-метасоматизированным мантийным перидотитом. А более поздние дериваты обязаны смещению базитовой и адакитовой родоначальных магм. Генерация высококремнистых адакитов связана с прямым плавлением субдуцируемой океанической коры, преобразованной в ходе погружения в амфиболиты или эклогиты. Адакитовые гранитоиды Макарьевского ареала формировались частичным плавлением (степень плавления около 50 %) 10 % гранатового амфиболита. Высокая флюидонасыщенность расплавов приводила к трансформации соотношений многих элементов с проявлением тетрадного эффекта фракционирования P3Э M- и W-типов. Уменьшение величины тетрадного эффекта фракционирования P3Э W-типа коррелируется с увеличением концентраций золота в породах. Пространственно и парагенетически с гранитоидами Макарьевского ареала связаны проявления золота скарнового и жильного типов.

Ключевые слова:

Габбро, диориты, тоналиты, трондjemиты, лейкограниты, высококремнистые адакиты, плавление флюид-метасоматизированного перидотита, частичное плавление гранатового амфиболита, смешение магм, тетрадный эффект фракционирования P3Э, золотое оруденение.

Введение

Адакитовые гранитоиды в силу своей специфики образования часто являются золотогенерирующими. Ярким примером связи адакитовых гранитоидов и золотого оруденения является Бакырчикское месторождение в Казахстане [1]. На территории Горного Алтая к адакитовому типу гранитоидов относятся кислые дериваты усть-беловского комплекса с ареалами: Бацелакским, Макарьевским, Чарышским, Усть-Чарышским, Курьино-Куяганским, Рыбалкинским, Чикетаманским. Для выявления рудогенерирующей и металлогенической роли магматических комплексов чаще всего используются петролого-геохимические критерии. По Макарьевскому ареалу гранитоидов усть-беловского комплекса получены новые аналитические данные, которые позволяют совместно с геологическими данными конкретизировать петрологические и гео-

химические особенности, а также металлогеническую специфику гранитоидов этого района.

Результаты исследований

К Макарьевскому ареалу гранитоидов относятся массивы: Черноключевский, Сосновский, Усть-Осиновский, Щемиловский, Макарьевский и другие. В их составе выделяются 5 фаз: 1 – габброиды; 2 – диориты и кварцевые диориты; 3 – тоналиты; 4 – трондjemиты; 5 – лейкограниты.

Габброиды первой фазы комплекса 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 внутренние части интрузивов Сосновского, Черно-

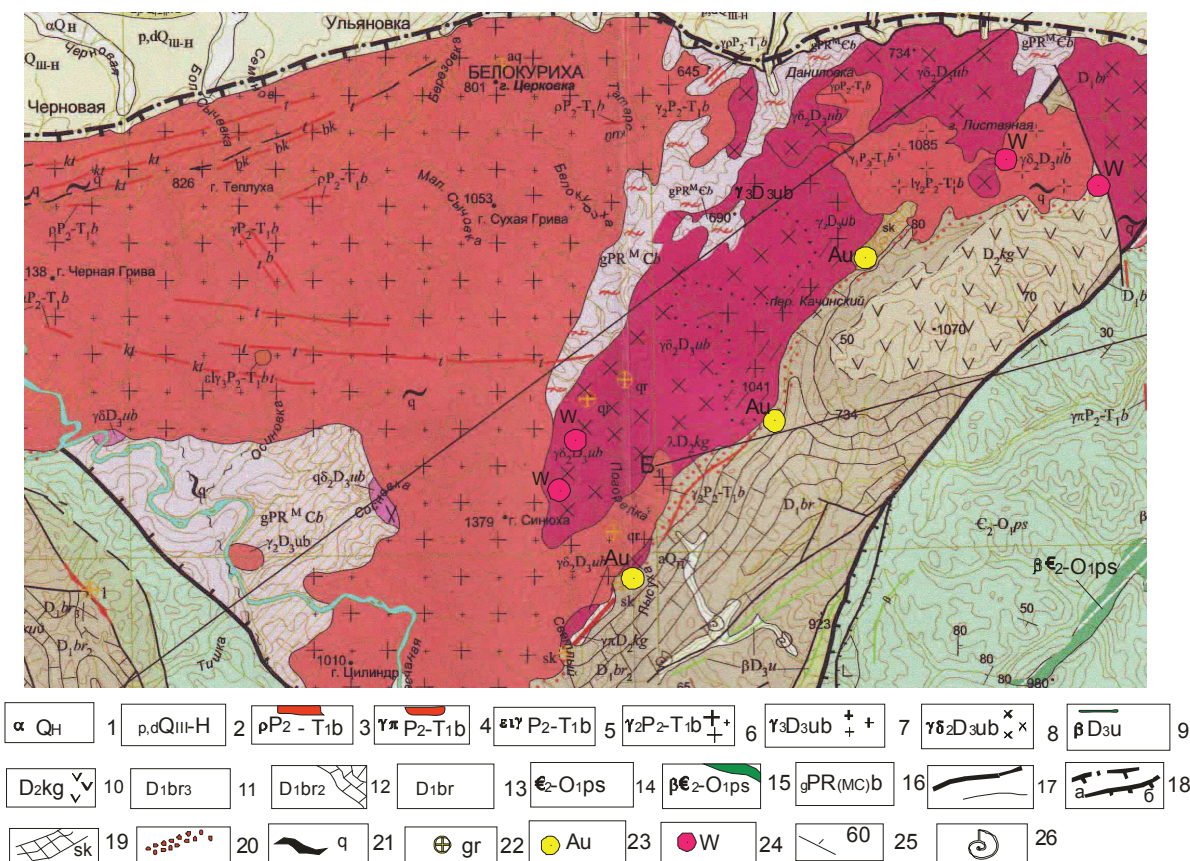


Рис. 1. Карта полезных ископаемых Макарьевского ареала по В.А. Кривчикову с добавлениями А.И. Гусева: 1 – Аллювиальные отложения пойм; 2 – пролювиальные и делювиальные отложения; белокурихинский комплекс: 3 – дайки аплитов; 4 – дайки гранит-порфиров; 5 – умеренно-щелочные лейкограниты биотитовые и двуслюдяные третьей фазы; 6 – граниты порфировидные главной (второй) фазы; усть-беловский комплекс 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 биогермиевые 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 фазии; тектонические нарушения: 17 – сбросы, сдвиги; 18 – надвиги: а) под покровом четвертичных образований; б) в коренном залегании; 19 – скарны; 20 – роговики; 21 – кварцевые жилы; 22 – грейзены; 23 – проявления золота; 24 – месторождения вольфрама; 25 – элементы залегания пород; 26 – места находок фауны

Fig. 1. Map of mineral resources of Makarevskii range by A.D. Krivchikov with additions of A.I. Gusev: 1 – alluvial deposits of alluvial flats; 2 – proluvial and deluvial deposits; Belokurikhinskii complex: 3 – dikes of aplite; 4 – dikes of granite porphyries; 5 – moderate alkali biotite leucogranites and two mica leucogranites of the third phase; 6 – porphyritic granites of the main (second) phase; Ust-Belovskii complex of Makarevskii range: 7 – granodiorites of the third phase; 8 – diorites, quartz diorites of the second phase; 9 – dikes of dolerites of Ursulskii complex; 10 – lava of andesites, andesi-basalts, basalts, dacites, riolites and tuffs, tufflava of middle and acidic composition of Kuyaganskaya suite; Baragashskaya suite: 11 – sandstones, alevrolites, limestones of the upper subsuite; 12 – biohermalimestones of middle subsuite; 13 – variegated sandstones, alevrolites, limestones, gravellites, conglomerates of lower subsuite; Peschanskii complex: 14 – variegated sandstones, alevrolites, phyllites, tuffites, gravellites of Peschanskaya suite; 15 – sills of dolerites; 16 – gneiss, schists, amphibolites of Belokurikhinskii poly metamorphic complex of epidot-amphibolite phase; tectonic breaks: 17 – normal faults, reverse fault, strike-slip faults; 18 – thrust faults: a) under the Anthropogenic deposits; b) in the primary attitude; 19 – skarns; 20 – hornfels; 21 – quartz lodes; 22 – greisens; 23 – gold occurrence; 24 – tungstendeposits; 25 – elements of rock bedding; 26 – spots of fauna findings

ключевого и других. Тоналиты, как правило, занимают также внутренние части интрузий и являются основной фазой. Центральные части массивов занимают более поздние фазы: граниты, трондjemиты, лейкограниты.

Массивы Макарьевского ареала, вероятно, представляют собой части изначально крупных

интрузивных тел, разобленных внедрившимся Белокурихинским плутоном (рис. 1) [2].

По результатам бурения гранитоиды Макарьевского ареала усть-беловского комплекса 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 секущее 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. Контактково-метаморфические изменения протерозойских кристаллических сланцев 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 рядом исследователей рассматривались в составе метаморфических образований [3]. Однако на соседней к востоку площади (район р. Даниловка) установлено, что гнейсовидные, плейчатые разности и массивные тоналиты имеют один и тот же химический состав и возраст (соответственно 349 и 353 млн лет U/Pb-методом по цирконам), резко отличающийся от возраста метаморфитов [4]. Гнейсовидность гранитоидов Черноключевского и Усть-Осиновского массивов является первично магматической. В этих массивах наблюдаются постепенные переходы от гнейсовидно-полосчатых гранодиоритов, тоналитов эндоконтактных частей интрузий к массивным меланогранитам по мере удаления от контактов. При этом гранитоиды с директивными текстурами не обнаруживают заметного катаклаза и милонитизации. Гнейсовидные гранитоиды характеризуются плитчатой отдельностью; ориентировка плитчатости и гнейсовидности совпадает. В массивных гранитах преобладает крупнолыбовая матрацевидная отдельность. По особенностям минерального состава: слабо железистому биотиту ($F=52-60$), нерешетчатому триклинному ортоклазу ($2V=70-74^\circ$), зональному плагиоклазу, обыкновенной роговой обманке, а также петрохимии массивные и гнейсовидные гранитоиды обнаруживают большое сходство с одноименными разностями Башчелакского ареала и других участков распространения пород усть-беловского комплекса.

Для массивов Макарьевского ареала не характерны дайковые породы.

Гранитоиды усть-беловского комплекса формировались в мезоабиссальной обстановке. На это указывают средне-крупнозернистые монцититовые 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. Характерной особенностью диоритов, тоналитов и гранодиоритов являются многочисленные меланократовые включения, указывающие на процесс минглинга/смещения базальтоидной магмы с более кислой [5].

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 [3] указывают на широкую ассимиляцию корового материала базитовой магмой. Геохимическая специализация гранитоидов усть-беловского комплекса – V, Co, Sc, а ведущая металлогеническая – Au, Cu, Mo. Гранитоиды Макарьевского ареала являлись рудовмещающей средой при формировании месторождений вольфрама, парагенетический пространственносвязанных с лейкогранитами белокурихинского комплекса.

Позднедевонский 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); 353 ± 12 млн лет (Макарьевский массив). Для сравнения гранитоиды Верхнебашчелакского массива к югу от Макарьевского ареала, по данным С.П. Шокальского, имеют возраст 371 ± 15 млн лет (U/Pb-методом по цирконам) и прорываются гранитами боровлянского комплекса с возрастом 362 ± 8 млн лет (U/Pb-методом по цирконам).

Представительные анализы пород Макарьевского ареала сведены в табл. 1.

Породные типы обогащены флюид-обильными литофильными элементами (LILE), такими как K, Rb, Ba, и деплетированы высоко зарядными элементами (HFSE_s), такими как Zr, Nb, Ta, подтверждающими их деривацию из метасоматизированного мантийного источника [7].

Нормированные отношения $(\text{La}/\text{Yb})_N$ к хондриту варьируют от 5,66 до 19,8 и указывают на дифференцированный тип распределения. Наиболее высокие отношения свойственны тоналитам, трондjemитам, лейкогранитам. Отношения U/Th во всех породных типах менее 1 и свидетельствуют о неизменённой их природе вторичными наложенными процессами. Концентрации золота в породах Макарьевского ареала варьируют от 70 до 183 мг/т, а висмута – от 0,3 до 3,8 г/т.

По комплексу признаков кислые разности пород Макарьевского ареала следует относить к адакитовым гранитоидам. К адакитовому типу гранитоидов (AD), как известно, относятся специфические кислые интрузивные породы, обнаруживающие сходство с эффузивными адакитами. К числу таких признаков относятся очень низкие концен-

Таблица 1. Представительные анализы интрузивных пород усть-беловского комплекса Макарьевского ареала (оксиды мас. %, элементы в г/т, золото в мг/т)**Table 1.** Representative analysis of intrusive rocks of Ust-Belovskii complex in Ust-Belovskii complex in Makarevskii range (oxides – wt. %, elements – g/t, gold – mg/t)

	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	4,9	5,5	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
Au	95	130	85	99	183	70	80	94	180	90
Bi	1,6	2,0	0,8	1,7	3,8	0,3	0,6	1,3	2,9	1,2
(La/Yb)N	3,1	3,0	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 редкоземельных элементов (РЗЭ) нормированы по хондриту по [6]. Породы Макарьевского ареала: 1–2 – габбро; 3–4 – диориты; 5–6 – тоналиты; 7 – тронджемит; 8–10 – лейкограниты.

Note. Fe₂O_{3t} – total iron; rare earth elements (REE) values are chondrite normalized by [6]. The rocks of Makarevskii range: 1–2 – gabbro; 3–4 – diorites; 5–6 – tonalities; 7 – trondhjemites; 8–10 – leucogranites.

трации 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 тоналитах, 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 скандия и никеля и пониженные концентрации MgO (0,17–2,1).

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

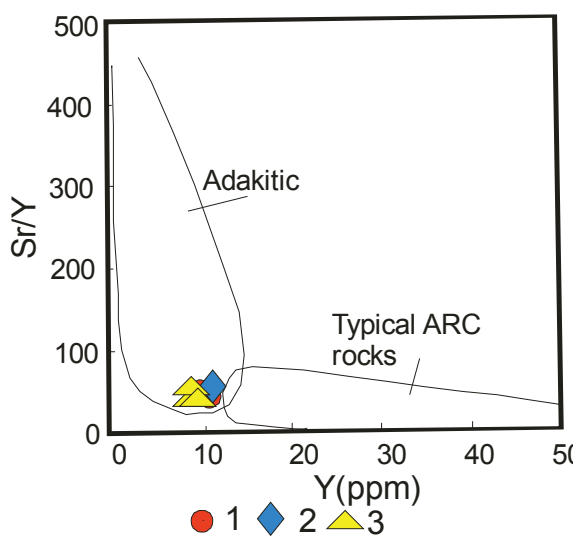


Рис. 2. Диаграмма Sr/Y–Y по [8] для кислых пород Макарьевского ареала усть-беловского комплекса: Adakitic – адакиты; Typical Arcrocks – типичные островодужные породы. 1 – тоналиты; 2 – трондъемиты; 3 – лейкограниты

Fig. 2. Sr/Y–Y diagram by [8] for acidic rocks of Makarevskii range of Ust-Belovskii complex: 1 – tonalities; 2 – trondhjemites; 3 – leucogranites

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

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

В породах Макарьевского ареала усть-беловского комплекса проявлены 2 типа тетраэдрного эффекта фракционирования (ТЭФ) редкоземельных

элементов: М-тип со значимыми величинами, превышающими 1,1, и W-тип со значимыми величинами менее 0,9 [10].

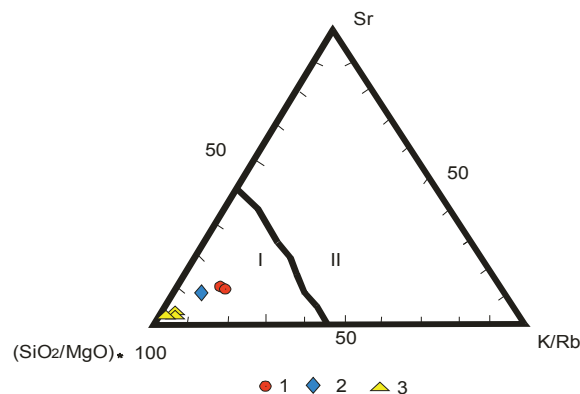


Рис. 3. Диаграмма Sr–K/Rb– $(SiO_2/MgO) \cdot 100$ по [9] для адакитовых гранитоидов Макарьевского ареала. Поля адакитов: I – высококремнистых, II – низкокремнистых. Остальные условные обозначения – на рис. 2

Fig. 3. Sr–K/Rb– $(SiO_2/MgO) \cdot 100$ diagram by [9] for adakitic-granitoids of Makarevskii range. I – High silica adakite, II – low silica adakite. The legend is in Fig. 2

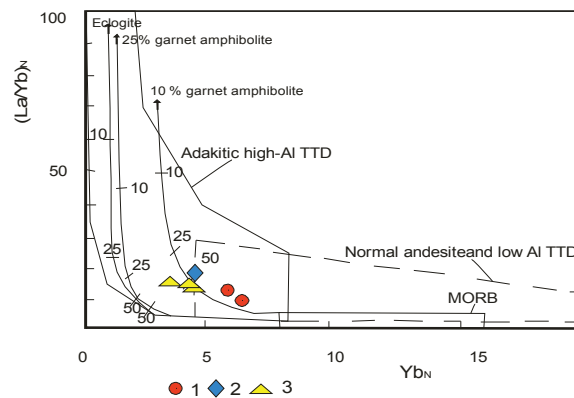


Рис. 4. Диаграмма $(La/Yb)_N$ – Yb_N по [11, 12] для гранитоидов Макарьевского ареала Adakitic high-AlTTD – адакиты высоко-Al тоналит-трондъемит-дацитовые; Normal and esite and low-AlTTD – нормальные андезиты и низко-Al тоналит-трондъемит-дацитовые. MORB – океанические базальты изофиолитового блока пояса Мина-Льюпо [12]; eclogite – эклогиты; 25 % garnet amphibolites – 25 % гранатового амфиболита; 10 % garnet amphibolites – 10 % гранатового амфиболита. Условные обозначения – на рис. 1.

Fig. 4. $(La/Yb)_N$ – Yb_N diagram by [11, 12] for granitoids of Makarevskii range. The legend is in Fig. 2.

Следует указать, что оба типа ТЭФ РЗЭ со значимыми величинами отмечаются в породах от диоритов до лейкогранитов, то есть во всех дериватах смешанного типа и заключительных фазах с преобладанием адакитовых меток, выявляемых 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 других [4].

Таблица 2. Отношения элементов и значения ТЭФ РЗЭ в адакитовых гранитоидах Макарьевского ареала усть-беловского комплекса

Table 2. Ratio of elements and values of tetrad effect of REE fractionation in adakitic granitoids of Makarevskii range of Ust-Belovskii complex

Отношения элементов и значения ТЭФ в породах Ratio of elements and values of TEF in rocks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Отношения в хондритах Ratio in chondrites
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} – ТЭФ РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [13]; Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Значения в хондритах приняты по [6]. Породы Макарьевского ареала: 1–2 – габбро; 3–4 – диориты; 5–6 – тоналиты; 7 – тронджемит; 8–10 – лейкограниты.

Note. TE_{1,3} – REETEF (average between the first and the third tetrads) by V. Irber [13]; Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Values in chondrites are taken by [6]. The rocks of Makarevskii range: 1–2 – gabbro; 3–4 – diorites; 5–6 – tonalities; 7 – trondhjemites; 8–10 – leucogranites.

Показательны соотношения Zr/Hf к ТЭФ РЗЭ. На диаграмме просматриваются два тренда: 1) тренд увеличения значений ТЭФ РЗЭ М-типа с увеличением отношений Zr/Hf; 2) тренд уменьшения ТЭФ РЗЭ W-типа с увеличением отношений Zr/Hf (рис. 5). Эти тренды указывают на сильно дифференцированный тип распределения элементов в породах.

В табл. 2 приведены также показательные отношения элементов в сравнении с хондритовыми, которые указывают значительные вариации отношений относительно хондритовых. Часть отношений имеют величины ниже хондритовых (Y/Ho, Zr/Hf, La/Nb), другие отношения элементов имеют величины выше хондритовых (La/Ta, Sr/Eu, Sr/Y). Отношение Eu/Eu* имеет величины

и выше, и ниже хондритовых. Негативные 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. 6). На диаграмме видно, что фигуративные точки составов пород локализируются за пределами поля CHARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED – заряд–радиус контролируемые соотношения) [15], указывая, что элементы с одинаковым ионным радиусом и зарядом (пары Y–Ho и Zr–Hf) экстремально не когерентны в расплавах и ранних, и поздних фаз Макарьевского ареала, что связано с аномальной флюидонасыщенностью родоначальных расплавов [5].

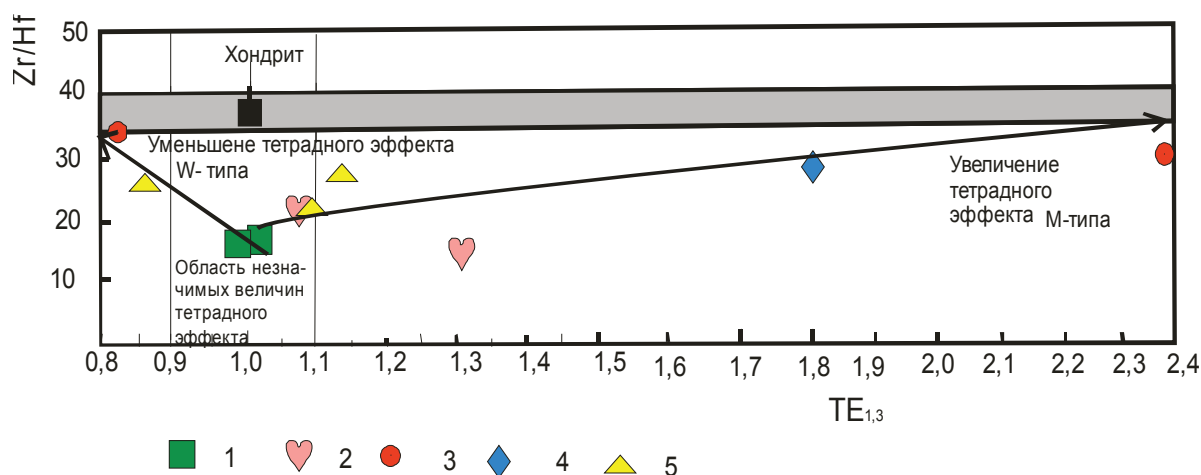


Рис. 5. Диаграмма соотношений Zr/Hf–TE_{1,3} по [14] с добавлениями автора для пород Макарьевского ареала усть-беловского комплекса. Породы Макарьевского ареала: 1 – габбро; 2 – диориты; 3 – тоналиты; 4 – тронджемит; 5 – лейкограниты

Fig. 5. Diagram of Zr/Hf–TE_{1,3} ratio by [14] with additions of the author for rocks of Makarevskii range of Ust-Belovskii complex. Rocks of Makarevskii range: 1 – gabbro; 2 – diorites; 3 – tonalities; 4 – trondhjemites; 5 – leucogranites

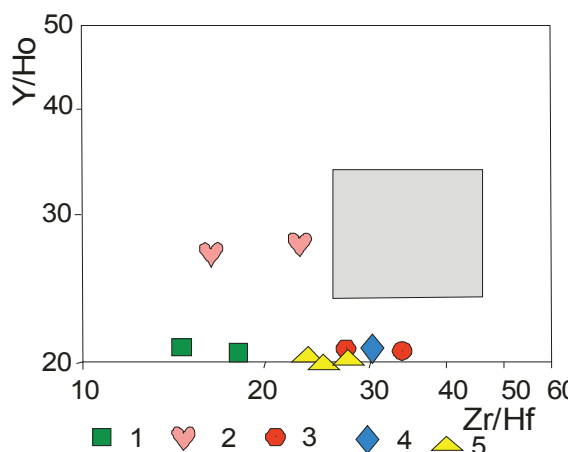


Рис. 6. Диаграмма Zr/Hf–Y/Ho для пород Макарьевского ареала. Серое поле HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) на диаграмме выделено по [15]. Условные обозначения – на рис. 5

Fig. 6. Zr/Hf–Y/Ho diagram for rocks of Makarevskii range. Gray field HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) is marked by [15]. The legend is in Fig. 5

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 закристаллизоваться и более поздние фазы их легко прорывают и располагаются в центре plutонов с формированием нормальной зональности. Такому сценарию отвечает формирование интрузивов Макарьевского ареала.

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 ранне-палеозойских plutонов на северо-западе Китайского Тянь-Шаня, показывающих близкие геохимические характеристики к таковым габброидов Макарьевского ареала [16]. Габброиды имеют низкие Sr/Y (12,4–12,8), (La/Yb)_N (3,0–3,1), но высокие концентрации Y, Sc, тяжёлых РЗЭ, что позволяет связывать их образование с плавлением литосферного мантийного источника без остаточного граната.

Диоритоидные разности Макарьевского ареала, вероятно, представляют собой смешанные образования базальтоидов и адакитовых расплавов, а тоналиты, трондземиты и лейкограниты заключительных фаз – в большей степени дериватами адакитовых расплавов и в меньшей степени – смешанного источника.

Генерация высококремнистых адакитов связана с прямым плавлением субдуцируемой океанической коры, преобразованной в ходе погружения

в амфиболиты или эклогиты [16–19]. Для адакитовых гранитоидов Макарьевского ареала реставрируется высокая степень частичного плавления 10 % гранатового амфиболита. Ассоциация габброидов и адакитовых гранитоидов усть-беловского комплекса широко распространена не только в Горном Алтае, но и в Рудном Алтае (Междуреченский, Локтевский ареалы). Это событие в интервале 349–371 млн лет назад связывается с коровым утолщением, инициированным подтоком мантийно-производных магм базальтоидного состава на большой площади.

Высокая флюидонасыщенность расплавов усть-беловского комплекса (Бащелак, Чикетаман, Мурзинка, Эдиган) выдерживается повсеместно на территории Горного Алтая [20]. Она свойственна и глубинному очагу Макарьевского ареала, что вызвало значительные трансформации в соотношениях различных элементов вплоть до проявления: 1 – заряд-радиус неконтролируемого поведения элементов в расплавах; 2 – двух типов ТЭФ РЗЭ (M и W).

Такие особенности поведения химических элементов в породах имеют отношение к рудоносности гранитоидов Макарьевского ареала. Соотношение концентраций золота и величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ отражено на рис. 7. На диаграмме отчетливо видны два тренда изменения ТЭФ РЗЭ: увеличение величины ТЭФ РЗЭ M-типа не влияет на содержания золота в расплаве. Уменьшение величины ТЭФ РЗЭ W-типа влечёт за собой увеличение концентраций золота в расплавах. Как показано нами ранее, концентрация золота в расплавах и последующее отделение в гидротермальные растворы зависит в значительной степени от физико-химических условий магматогенных флюидов, их состава и эволюции [21–23]. В то же время проявление ТЭФ РЗЭ также связано с составом флюидов и особенностями кислотности-щёлочности среды [21, 23].

Указанные закономерности определили и реальную металлогеническую роль петролого-геохимических особенностей глубинного очага, создавшего многообразные породные типы Макарьевского ареала. Пространственно и парагенетически с Сосновским массивом гранодиоритов и тоналитов усть-беловского комплекса связано разобоченное оруденение золота, локализованное в гранитоидах в кварц-сульфидных жилах с содержанием золота от 1 до 1,8 г/т и в скарнированных породах барагашской свиты в экзоконтакте массива с содержанием золота 0,5 г/т в ассоциации с вольфрамом 0,001 %, а также шлиховыми потоками с единичными знаками золота. Здесь же в экзоконтактной части массива известна непромышленная россыль 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 Щемилковского массива пространственно совпадают аллювиальные долинны россыпи

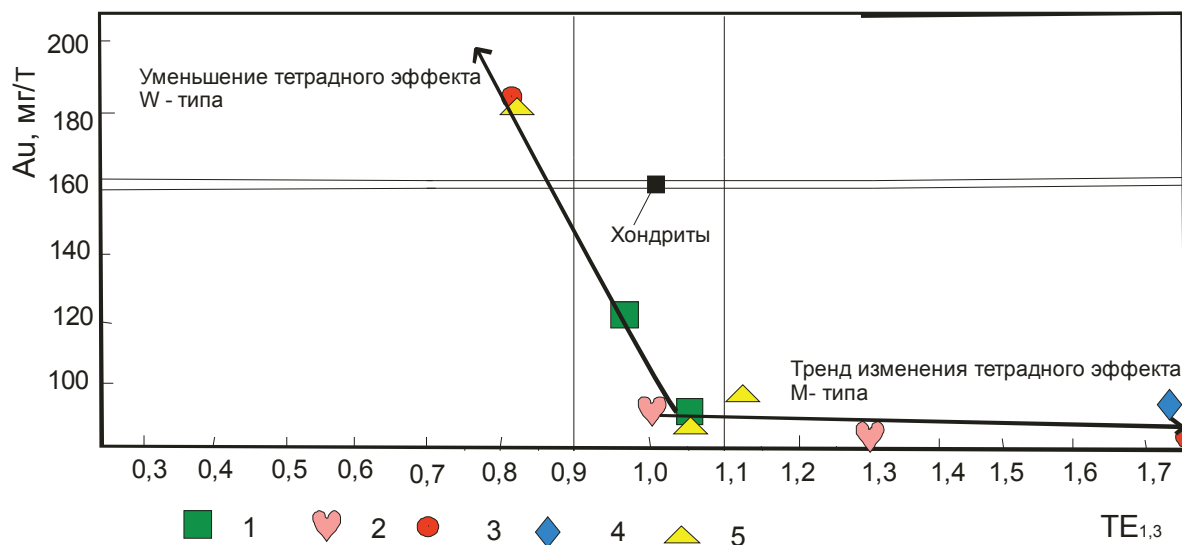


Рис. 7. Диаграмма Au-TE_{1,3} для пород Макарьевского ареала. Содержания золота в хондритах по [24]

Fig. 7. Au-TE_{1,3} diagram for rocks of Makarevskii range. Gold contents in chondrites by [24]. The legend is in Fig. 5

р. Шемиловки (Б. Шемиловки) и р. Каменки. Первая разрабатывалась, остаётся недоразведанной. Золото крупное, плохо окатанное. Запасы – 5,5 кг категории В+С₁. Россыль р. Каменки 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 тоналитов усть-беловского комплекса в зоне окварцевания с обильным пиритом по терригенным породам барагашской свиты определены содержания золота от 0,9 до 3,5 г/т.

На Лысухинском медно-золото-скарновом проявлении в контакте с тоналитами усть-беловского комплекса одноименного массива определены содержания золота от 0,5 до 2,1 г/т, серебра – от 15 до 45 г/т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробейников А.Ф., Гусев А.И., Русанов Г.Г. Петрология и золотоносность адakitовых гранитоидов Калбы // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 3. – С. 31–38.
2. Гусев А.И. Минерогения и полезные ископаемые Алтайского края. – Бийск: Изд-во ГОУВПО АГАО, 2011. – 365 с.
3. Владимир А.Г., Шокальский С.П., Пономарёва А.П. Позднепалеозойский-раннемезозойский гранитоидный магматизм и проблема рифтового этапа тектогенеза в Горном Алтае / Геологическое строение и полезные ископаемые западной части Алтае-Саянской горной области. – Новокузнецк: Изд-во Южсибгеолкома, 1995. – С. 186–189.
4. Владимир А.Г., Руднев С.Н. Изотопное датирование рудноносных магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области для Госгеолкарты-1000. – Новосибирск: Изд-во «Дом печати СО РАН». Отделение «ГЕО», 2002. – 307 с.
5. Experimental simulation of magma mixing at high pressure / M. Laumonier, B. Scaillet, L. Arbaret, R. Champallier // Lithos. – 2014. – V. 196. – P. 281–300.
6. Anders E., Greeves N. Abundances of the elements: meteoric and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
7. Middle Jurassic to Cenozoic evolution of arc magmatism during Neotethysubduction and arc-continent collision in the Kapan Zone, Southern Armenia / J. Mederer, R. Moritz, A. Ulianov, M. Chiaradia // Lithos. – 2013. – V. 177. – P. 61–78.
8. Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // Lithos. – 1999. – V. 46. – P. 605–626.
9. 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. – V. 79. – P. 1–24.
10. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: a method of quantification with application to rock and mineral

Заключение

Гранитоиды Макарьевского ареала по комплексу признаков относятся к адakitовому типу. Их формирование связано с плавлением 10 % гранатового амфиболита субдуцируемой океанической коры. Степень частичного плавления составляла 50 % и менее. Ассоциация габброидов и адakitовых гранитоидов и смешение различных по составу расплавов свидетельствует о коровом утолщении, вызванном подтоком со значительных глубин мантийно-производных магм базальтоидного состава. В породах проявлены два типа ТЭФ РЗЭ и заряд-радиус неконтролируемое поведение многих химических элементов в расплавах. С гранодиоритами и тоналитами некоторых массивов Макарьевского ареала пространственно и парагенетически связано жильное золото-сульфидно-кварцевое и скарновое медно-золоторудное оруденение.

- 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.
11. Drummond M.S., Defant M.J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons // *J. Geophys. Res.* – 1990. – V. 95. – P. 21503–21521.
 12. The Discovery of the High Depleted N-MORB-type Volcanic Rocks: New Evidence for Paleo Ocean of Mian-Lue / J.-F. Xu, X.Y. Yu, X.H. Li, Y.W. Han, J.H. Yu, J.H. Shen, B.R. Zhang // *Chinese Science Bulletin.* – 1998. – V. 43. – № 6. – P. 510–514.
 13. 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. 49–71.
 14. 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. – V. 59. – P. 171–198.
 15. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1995. – V.119. – P. 213–223.
 16. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes on early Paleozoic plutons in the northwestern Chinese Tianshan: Petrogenesis and geological implications / Z. Huang, X. Long, A. Kröner, Ch. Yuan, Q. Wang, G. Sun, G. Zhao, Y. Wang // *Lithos.* – 2013. – V. 182. – P. 48–66.
 17. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature.* – 1990. – V. 347. – № 4. – P. 662–665.
 18. Kay R.W. Aleutian magnesianandesites: melts from subducted Pacific Ocean crust // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* – 1978. – V. 4. – P. 117–132.
 19. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids // *Lithos.* – 1999. – V.46. – P. 411–429.
 20. Гусев А.И. Петрология адакитовых гранитоидов. – М.: Изд-во РАЕ, 2014. – 152 с.
 21. Коробейников А.Ф., Ананьев Ю.С., Гусев А.И. Мантийно-коровые рудообразующие системы, концентрирующие благородные металлы. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 262 с.
 22. Гусев А.И., Табакаева Е.М. Критерии продуктивных магматических комплексов Алтайского региона на золотое оруденение. – Бийск: Изд-во АГАО, 2014. – 145 с.
 23. Гусев А.И., Гусев Н.И. Анорогенные гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим. – Бийск: Изд-во АГАО, 2014. – 202 с.
 24. Sun S.S. Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1982. – V. 46. – P. 179–192.

Поступила 25.03.2015 г.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

PETROLOGY AND GOLD CONTENT OF ADAKITIC GRANITOIDS OF UST-BELOVSKII COMPLEX IN MAKAREVSKII RANGE OF GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev,

Shukshin Altai State Academy of Education, 11, Sovetskayastreet, Biysk, 659333, Russia. E-mail: anzerg@mail.ru

Aleksandr F. Korobeynikov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lev@tpu.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need of researching petro-geochemistry and petrologic peculiarities of gabbro-granitoid massifs of Makarevskii range which are related spatially to gold occurrence.

The main aim of the research is to study geological, petrological, geochemical features of all rock types of Ust-Belovskii complex in the range using canonic classification and experimental diagrams, which allow solving genetic problems.

The methods used in the study. Rare and scattered elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometry «OPTIMA-4300», for Cu, Zn, Pb, Li – by the methods of ISP-AES, the rest elements, including REE, were determined by ISP-MS methods in the VSEGEI Laboratory (St-Petersburg). Absolute age of granitoids was defined by U-Pb method SHRIMP II by zircon in the VSEGEI Laboratory (St-Petersburg). Gold and bismuth were defined by the neutron-activation method in the Laboratory OI-GaG SO RAN (Novosibirsk).

Results. The authors have corrected the absolute age of granitoids formation in Ust-Belovskii complex in Makarevskii range, it is $3497353 \pm 12,0$ for Sosnovskii and Makarevskii massifs. The paper describes a direct zoning in intrusive massifs formation. 5 phases were detached in composition of intrusive: gabbro, diorites, tonalities, trondhjemites, leucogranites. More evolution phases of leucogranites are located in the center of massif but early gabbros are on the periphery. The authors estimated different petrochemical coefficients, indices, modules for the rocks of the complex used for decoding the genesis. Granitoids of range refer to high silica adakitic granitoids. The ratios of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for granodiorites of Makarevskii massif is 0,711(0,712) are identified by mantle nature of melts, formed with crust material contamination. Gabbro of early phase of Makarevskii range were probably generated by partial melting of slab, represented by fluid-metasomatized mantle peridotite. More late derivatives are indebted to mixing of basaltic and adakitic parent magmas. Generation of high silica adakites is related to direct melting of subducted oceanic crust, transformed at immersion into amphibolites and eclogites. Adakitic granitoids of Makarevskii range were formed by partial melting (melting degrees is about 50 %) of 10 % garnet amphibolites. High fluid-saturation of melts resulted in transformation of ratios of many elements at occurrence of tetradic effect of M- and W-types REE fractionation. The paper indicates the space and paragenetic relation of different types of gold ore mineralization with granitoids of Makarevskii range.

Key words:

Gabbro, diorites, tonalities, trondhjemites, leucogranites, high silica adakite, melting of fluid-metasomatized peridotite, partial melting of garnet amphibolite, mixing of magmas, tetradic effect of REE fractionation, gold ore mineralization.

REFERENCES

- Korobeynikov A.F, Gusev A.I., Rusanov G.G. Petrologiya i zolotosnost adakitovykh granitoidov Kalby [Petrology and ash-content of adakitic granitoids of Kalba]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 31–38.
- Gusev A.I. *Minerageniya i poleznye iskopaemye Altayskogo kraja* [Minerageny and mineral resources in Altai region]. Biysk, SEUHP EASAE Press, 2011. 365 p.
- Vladimirov A.G., Shokalskiy S.P., Ponomareva A.P. Pozdne paleozoyskiy-rannemезozoyskiy granitoidnyy magmatizm i problema riftovogo etapa tektogeneza v Gornom Altai [Late Paleozoic–Early mezozoic granitoid magmatism and the problem of rift stage of tectogenesis in Gornii Altai]. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye zapadnoy chaste Altai-Sayanskoy gornoy oblasti* [Geological structure and mineral resources in western part of Altai-Sayan mountain region]. Novokuznetsk, Yuzhsibgeol Press, 1995. pp. 186–189.
- Vladimirov A.G., Rudnev S.N. *Izotopnoe datirovanie rudonosnykh magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov Altai-Sayanskoy skladchatoy oblasti dlya Gosgeolkart-1000* [Isotopic dating of ore-bearing magmatic and metamorphic complexes in Altai-Sayan folded area for Gosgeolkart-1000]. Novosibirsk, SB RAS Press, 2002. 307 p.
- Laumonier M., Scaillet B., Arbaret L., Champallier R. Experimental simulation of magma mixing at high pressure. *Lithos*, 2014, vol. 196, pp. 281–300.
- Anders E., Greeves N. Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.
- Mederer J., Moritz R., Ulianov A., Chiaradia M. Middle Jurassic to Cenozoic evolution of arc magmatism during Neotethys subduction and arc-continent collision in the Kapan Zone, Southern Armenia. *Lithos*, 2013, vol. 177, pp. 61–78.
- Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 605–626.
- 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.
- 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.
- Drummond M.S., Defant M.J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 1990, vol. 95, pp. 21503–21521.
- Xu J.-F., Yu X.-Y., Li X.-H., Han Y.-W., Yu J.-H., Shen J.-H., Zhang B.-R. 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.

13. 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. 49–71.
14. 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.
15. 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.
16. Huang Z., Long X., Kröner A., Yuan Ch., Wang Q., Sun G., Zhao G., Wang Y. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of early Paleozoic plutons in the northwestern Chinese Tianshan: Petrogenesis and geological implications. *Lithos*, 2013, vol. 182, pp. 48–66.
17. 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.
18. Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1978, vol. 4, pp. 117–132.
19. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 411–429.
20. Gusev A.I. *Petrologiya adakitovykh granitoidov* [Petrology of adakitic granitoids]. Moscow, RAE Press, 2014. 152 p.
21. Korobeynikov A.F., Ananov Yu.S., Gusev A.I. *Mantiyno korovye rudoobrazuyushchie sistemy, kontsentriruyushchie blagorodnye metally* [Mantle-crust ore-forming systems with noble metal concentration]. Tomsk, TPU Publ. house, 2012. 262 p.
22. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. *Kriterii produktivnykh magmaticheskikh kompleksov Altaiskogo regiona na zolotoe orudnenie* [Criteria of influence of productive magmatic complexes in Altai region on ore-grade gold mineralization]. Biysk, ASAE Press, 2014. 145 p.
23. Gusev A.I., Gusev N.I. *Anorogennyye granitoidy: petrologiya, geokhimiya, fluidnyy rezhim* [Anorogenic granitoids: petrology, geochemistry, fluid mode]. Biysk, ASAE Press, 2014. 202 p.
24. Sun S.S. Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1982, vol. 46, pp. 179–192.

Received: 25 March 2015.