№ 1(41) ♦ 2020

УДК (553.3/.4:553.2):550.42(571.151)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО КАРАКОЛЬСКОЙ УРАН-РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ МАГМО-РУДНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ГОРНОГО АЛТАЯ

А. И. Гусев

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В. М. Шукшина, Бийск, Алтайский край, Россия

Приведены дополнительные новые данные о строении и составе магматических, рудных образований и об околорудных метасоматических изменениях комплексного Каракольского месторождения Горного Алтая. Одноименный шток гранитоидов имеет зональное строение, сложен двуслюдяными гранитами с преобладанием биотита, двуслюдяными лейкогранитами с преобладанием мусковита, мусковитовыми лейкогранитами, мелкозернистыми двуслюдяными лейкогранит-порфирами и дайками аплитов, аляскитов. Породы штока являются результатом смешения различных по составу расплавов: известково-щелочного низкоалюминиевого и высокоалюминиевого адакитового с различной степенью частичного плавления гранатового амфиболита. В породах выражен тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов М-типа, с увеличением которого повышаются концентрации бериллия, что обусловлено переносом металла комплексными соединениями фтора в магматогенных флюидах. Приведенные данные позволяют выделить шток в самостоятельный каракольский гранит-лейкогранитовый комплекс раннетриасового возраста. Оруденение представлено грейзеново-молибденитовым минеральным типом с бериллом, молибденитом, халькопиритом, пиритом, висмутином. Обнаружена тантал-ниобиевая минерализация. Поздний тип оруденения представлен жилами карбонатов с торбернитом, метаторбернитом и отенитом.

***Ключевые слова**: граниты, лейкограниты, аплиты, шток, дайки, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М-типа, жилы, грейзены, бериллий, молибден, медь, висмут, тантал, ниобий, уран.*

NEW DATA ON THE KARAKOLSKAYA URANIUM-RARE METALLIC MAGMA-ORE-METASOMATIC SYSTEM OF THE GORNY ALTAI

A. I. Gusev

V.M.Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University, Biysk, Altai Krai, Russia

New data about geological structure and composition of magmatic, ore formations and wallrock metasomatic alterations of the complex Karakolskoe deposit of the Gorny Altai. The same-name stock has zonal structure and it is composed of two binary granites with predominance of biotite, two-micas leucogranites with predominant muscovite, muscovite leucogranites, fine-grained two-micas leucogranite-porphyres and dikes of aplites and alaskites. Stock rocks are due to the mixture of meltings various in composition: calc-alkalic low-aluminum one and high-aluminum adakitic one with different degrees of partial melting of garnetiferous amphibolite. The tetradic effect of the REE M-type fractionation manifests in rocks. Beryllium concentrations in rocks rise with an increase in value of tetradic effect of the REE M-type fractionation that is because of transfer of metal by complex compounds of fluorine in magmagene fluids. The data presented make it possible to single out the stock in the independent Karakolskiy granite-leucogranite complex of the Early Triassic. The ore mineralization is represented by a greisen-molybdenite mineral type with beryl, molybdenite, chalcopyrite, pyrite, bismuthine. The tantalum-niobium mineralization is discovered at first. The late type of ore mineralization is represented by lodes of carbonates with torbernite, metatorbernite and autunite.

***Keywords:** granites, leucogranites, aplites, stock, dikes, tetradic effect of fractionation of REE M-type, lodes, greisens, beryllium, molybdenium, copper, bismuth, tantalium, niobium, uranium.*

DOI 10.20403/2078-0575-2020-1-70-80

В Горном Алтае имеется ряд перспективных месторождений различных металлов, которые изучались еще в середине прошлого века. К их числу можно отнести комплексное уран-редкометалльное Каракольское месторождение. Необычность состава его руд и долгое время, прошедшее после его изучения, послужили причиной для ревизионных работ на нем путем использования современных лабораторных исследований руд и магматических образований. Автором в 2015–2018 гг. на месторождении проведены полевые работы и лабораторные исследования магматитов и руд, результаты которого и стали предметом данной статьи.

Актуальность исследований не вызывает сомнений, так как Каракольское месторождение входит в перечень месторождений, учтенных Государственным балансом России по бериллию (одно из 11 объектов в России) [8]. Кроме того, это единственное месторождение на Алтае, в рудах которого присутствутт одновременно урановое и редкометалльное оруденение.

Цель исследования – провести полевые ревизионные работы, специализированное металлогеническое изучение и анализ современными прецизионными лабораторными методами магматических пород, руд и минералов для получения новых

данных по вещественному составу руд и переоценке месторождения.

Известно, что бериллиевое и молибденовое грейзеновое оруденение связано с гранитоидным магматизмом [1, 6–10, 12], который обладает специфическими особенностями. Такие месторождения относятся к группе интрузивно-связанных.

Магматизм месторождения

Каракольское месторождение находится на водоразделе рек Усть-Куча, Колбала и Солоновка. Оно было открыто и впервые изучено В. А. Кузнецовым [6], впоследствии изучалось А. Г. Бетехтиным [1]; А. И. Александровым (1947); В. А. Золотаревым; Я. А. Косалсом, а также В. И. Сотниковым, Е. И. Никитиной (1971).

Приурочено месторождение к одноименному интрузивному массиву площадью около 36 км^2. В его составе определены двуслюдяные порфировидные граниты главной фазы, а также лейкогранит-порфиры биотитовые, мелкозернистые двуслюдяные лейкогранит-порфиры, жилы аплитов и редко аляскитов.

Массив имеет зональное строение. Известно, что характер зональности интрузивов интерпретируется как результат химической дифференциации и скорости поступления последовательных фаз из глубинного магматического очага. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие ингредиенты не успевали закристаллизоваться, и более поздние фазы легко их прорывали и располагались в центре плутонов с формированием нормальной зональности по [26]. Такому сценарию отвечает формирование интрузивных фаз Каракольского штока (рис. 1).

Двуслюдяные порфировидные граниты главной фазы имеют порфировидный облик, они серые с розоватым оттенком. Структура породы порфиро-

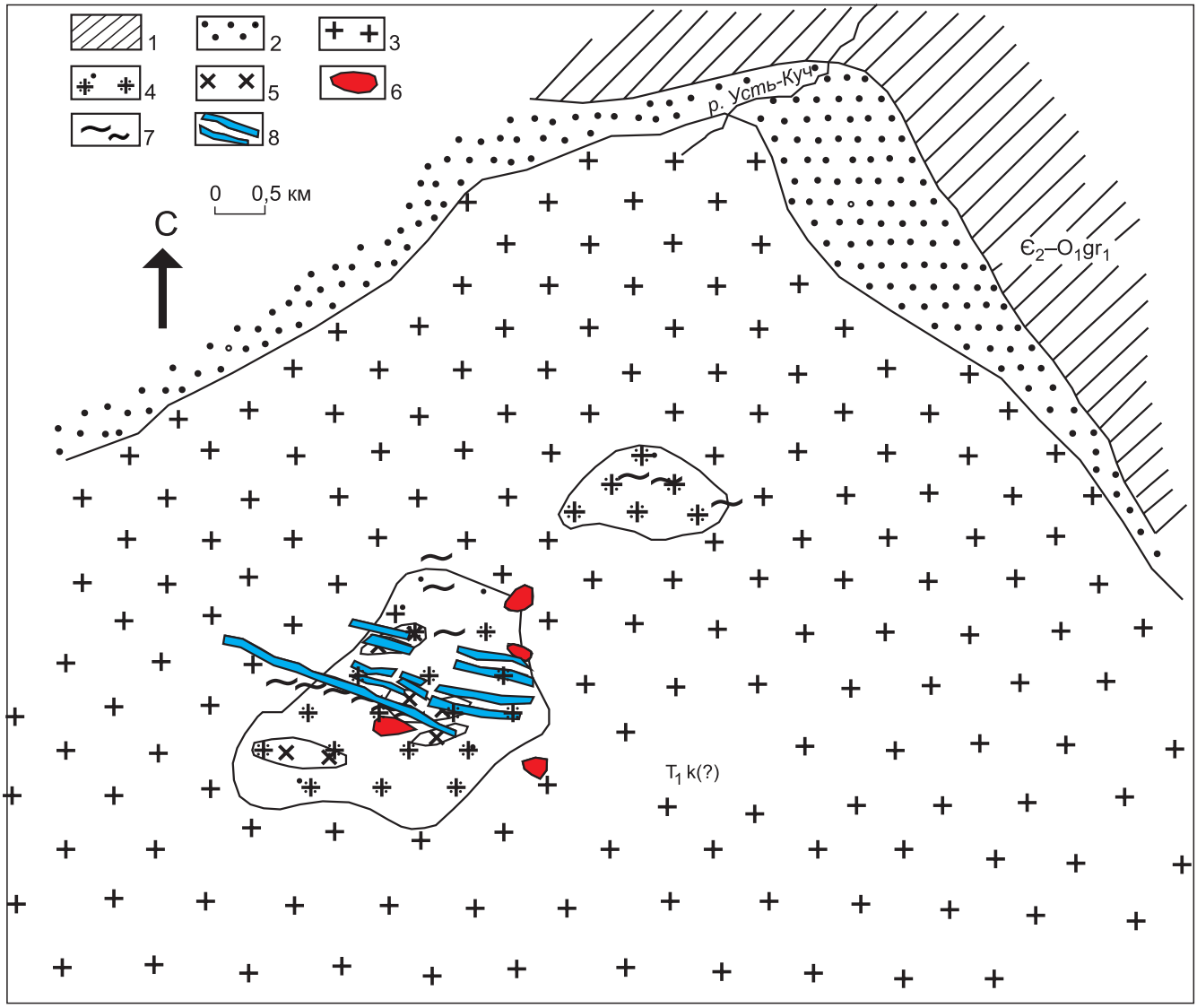

Рис. 1. Схематическая геологическая карта Каракольского месторождения (по данным ГРП с добавлениями автора)

1 – песчаники, алевролиты и аргиллиты горноалтайской серии; 2 – роговики; гранитоиды Каракольского штока: 3 – двуслюдяные порфировидные граниты главной фазы с преобладанием биотита; 2-я фаза: 4 – двуслюдяные лейкограниты с преобладанием биотита, 5 – мелкозернистые мусковитовые лейкограниты, 6 – мелкозернистые двуслюдяные лейкогранит-порфиры, 7 – дайки аплитов и аляскитов, 8 – кварцевые жилы, сопровождаемые грейзенами

Таблица 1

Химический состав гранитоидов Каракольского массива (оксиды в мас. %, элементы в г/т)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2	71,31	73	72,7	72,5	73,6	74,2	73,7	74,8	75,8	76,2
TiO_2	0,24	0,25	0,17	0,19	0,11	0,09	0,12	0,093	0,042	0,03
Al_20_3	14,49	14,1	14,6	14,53	14,7	14,6	14,4	13,7	13,7	13,64
Fe_2O_3	0,9	0,68	0,15	0,21	0,27	0,25	0,41	0,75	0,22	0,3
FeO	1,42	1,02	1,31	1,26	0,73	0,8	0,73	0,12	0,36	0,35
MnO	0,1	0,073	0,072	0,06	0,045	0,04	0,06	0,077	0,22	0,1
MgO	0,62	0,51	0,46	0,45	0,23	0,25	0,32	0,22	<0,1	0,12
CaO	1,35	1,31	1,36	1,34	0,96	0,92	1,15	1,1	0,71	0,68
Na_2O	4,04	3,02	3,57	3,8	3,8	3,76	3,77	3,72	4,48	4,42
K_2O	3,94	4,71	4,07	4,1	4,07	4,12	3,85	4,13	3,54	3,62
P_2O_5	0,24	0,2	0,24	0,28	0,26	0,27	0,25	0,22	0,095	0,08
Be	6,4	5,76	12,11	10,6	8,25	9,4	9,83	4,72	4,98	4,76
Sc	5,34	5,66	4,57	4,1	2,3	2,1	2,72	2,47	4,3	4,2
V	22,3	24	17,8	18,3	7,65	6,3	7,45	7,68	2,75	2,8
Cr	45,7	44,8	36,1	38,2	35,3	32,5	22,6	26,3	27,4	26,5
Co	4,2	3,52	2,99	3,03	1,09	0,97	1,39	1,09	<0,5	1,3
Ni	4,87	4,65	3,49	3,21	1,5	1,1	1,65	1,56	<1,0	1,2
Ga	20,5	19,8	17	18,4	19	18,6	17,9	20,6	21,6	23,1
Rb	304	297	294	303	309	312	249	396	374	382
Sr	95,7	87,9	93	87,5	80,3	78,4	105	85,3	2,44	5,3
Y	26,4	25,1	12,6	12,4	6,95	7,1	5,49	7,04	18	16,8
Zr	132	122	82,6	81,5	61	64,5	64,2	48,8	34,7	36,3
Nb	24,3	23,2	18,2	19,3	22	23,7	16,3	25,3	30,6	29,5
Cs	25,1	24,9	19,9	20,5	33,4	34,1	35,1	26,7	16,1	15,3
Ba	225	232	299	302	240	255	340	80,5	5,55	6,3
La	31,3	28,5	18,5	20,4	12,4	13,2	14,5	9,69	3,98	4,6
Ce	65,2	62,9	37,4	37,3	25,7	25,3	29,4	20,1	10,4	8,2
Pr	7,5	7,09	4,35	4,28	2,99	3,01	3,36	2,46	1,61	1,63
Nd	28,3	26	15,3	16,3	10,6	10,4	11,7	8,17	5,58	5,6
Sm	5,7	5,49	3,49	3,5	2,43	2,41	2,77	1,79	2,02	2,4
Eu	0,57	0,66	0,59	0,45	0,43	0,42	0,63	0,28	0,052	0,07
Gd	5,1	4,65	3,33	3,45	2,01	2,12	2,27	1,63	1,76	1,85
Tb	0,7	0,66	0,46	0,52	0,35	0,39	0,34	0,26	0,39	0,42
Dy	4,2	4,02	2,51	2,61	1,41	1,47	1,06	1,51	2,54	2,6
Ho	0,83	0,8	0,43	0,52	0,26	0,3	0,16	0,33	0,48	0,52
Er	2,54	2,59	1,04	1,13	0,62	0,7	0,39	0,85	1,49	1,55
Tm	0,42	0,39	0,14	0,32	0,089	0,1	0,039	0,14	0,4	0,47
Yb	2,94	2,87	1	1,6	0,62	0,84	0,39	1,08	3,6	4,0
Lu	0,51	0,44	0,12	0,34	0,085	0,1	0,054	0,18	0,56	0,54
Hf	3,94	3,83	2,79	2,93	2,08	2,6	2,1	1,92	3,17	3,3
Ta	3,55	3,42	3,73	3,62	4,81	4,91	3,98	6,38	4,35	4,4
W	2,76	2,8	2,65	2,72	3,83	3,95	2,77	5,16	3,51	3,7
Mo	4,98	4,44	2,74	2,95	3,71	3,84	2,18	1,99	1,91	2,3
Th	21,6	22	8,78	9,2	6,07	6,5	5,99	6,62	5,24	5,8
U	4,52	4,31	12	11,4	8,74	8,62	5,21	22,5	4,08	4,3
Cu	34,7	30,7	18,7	19,3	109	115	111	24,3	3,71	9,8
Pb	25,8	32,6	35,8	36,2	31,1	32,5	4,1	19,4	16,6	15,7
Zn	55,1	52,4	45,3	43,7	50,5	51,6	54,7	50,7	9,89	12,4
Sb	1,5	1,33	0,41	0,7	0,82	0,93	0,33	0,23	0,14	0,32
Sn	3,65	3,35	5,11	5,3	3,47	3,51	3,66	1,89	2,37	2,5
Li	162	153	259	267	218	223	229	162	60,8	55,7

Окончание табл. 1

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ag	0,073	0,066	0,093	0,084	0,12	0,1	0,12	0,053	0,052	0,04
Bi	0,52	0,46	0,85	0,74	1,01	0,83	0,41	0,26	0,2	0,27
∑REE	182,2	172,2	101,3	105,1	66,94	67,86	72,55	57,51	52,86	51,25
$(La/Yb)_N$	7,05	6,56	12,2	8,4	13,2	10,4	24,6	5,93	0,73	0,37
Eu/Eu*	0,32	0,39	0,08	0,098	0,58	0,56	0,76	0,5	0,53	0,39
$TE_{1,3}$	0,98	1,01	1,21	1,11	1,07	1,04	1,08	1,02	1,03	0,97
Sr/Y	3,6	3,5	7,4	7,0	11,5	11,04	19,1	12,1	0,13	0,31

Примечания. Анализы выполнены методами эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS и ISP-AES на спектрометре «OPTIMA-4300 в лабораториях ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) и ИМГРЭ (Москва). Нормализация относительно хондрита проведена по [13]. $TE_{1,3}$ – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирберу [18]; Eu* = $(Sm_N+Gd_N)/2$; породы: 1, 2 – двуслюдяные порфировидные граниты главной фазы; 2, 3 – жилы аплитов; 5–8 – лейкогранит-порфиры биотитовые; 9, 10 – мелкозернистые двуслюдяные лейкогранит-порфиры.

вая, основной ткани породы – гипидиоморфно-зернистая. Порфировые вкрапленники представлены плагиоклазом, реже калиевым полевым шпатом. Основная ткань породы сложена кварцем, плагиоклазом 2-й генерации, калиевым полевым шпатом, биотитом, мусковитом, редко роговой обманкой, эпидотом. Плагиоклаз вкрапленников (1-й генерации) зонален, образует призматические выделения размерами от 0,3×0,9 до 0,5×1,5 см. В ядре определяется андезин № 42–46, а по периферии – альбит № 8–9 в виде светлой каемки до 0,05 мм шириной. Плагиоклаз 2-й генерации коротко-призматический, или таблитчатый, относится к олигоклаз-андезину № 27–32. Амфибол определен как обыкновенная роговая обманка, которая часто замещается эпидотом и хлоритом.

Из акцессориев в гранит-порфирах присутствуют (г/т): магнетит 50–400, сфен 20–500, циркон 20–400, апатит 14–360. В единичных знаках отмечены ильменит, монацит, ортит, флюорит, турмалин, самородные висмут и свинец. Резкое преобладание магнетита над ильменитом позволяет относить гранитоиды массива к магнетитовому (окисленному) типу по [19].

Мелкозернистые лейкогранит-порфиры – розовато-серые и светло-серые двуслюдяные массивные, местами неравномерно-зернистые породы. Состав (%): калиевый полевой шпат 25–40, кварц 30–36, альбит-олигоклаз 30–33, роговая обманка 2–3, биотит 1–3, мусковит 1–3. Редко присутствуют микрографические сростки кварца и калишпата размером до 2 мм. Изредка в калиевом полевом шпате проявлена «микроклиновая решетка». Биотит по химическому составу относится к ряду истонит – сидерофиллит. Акцессорные минералы – апатит, магнетит, ортит, циркон, редко сфен, монацит, турмалин, пирит, халькопирит, молибденит. Наиболее тесная пространственная связь грейзенового оруденения отмечается именно с этими двуслюдяными мелкозернистыми лейкогранит-порфирами.

Жилы аплитов маломощные (3–8 см) и непротяженные (10–18 м). Аплиты – светло-серые породы, иногда с желтоватым оттенком. Структура аплитовая, местами гипидиоморфно-зернистая. Состав (%): микроклин 28–41, кварц 33–38, альбит 31–35, мусковит 1–2. Акцессории: циркон, апатит, турмалин, халькопирит, пирит.

Скопление жил аплитов характерно в районе жил Каракольского месторождения и в гранитоидах главной фазы.

Возраст гранитоидов Каракольского массива U-Pb методом по циркону составляет 244±2 млн лет. Это отвечает раннему триасу. Ранее Каракольский массив относили к белокурихинскому комплексу (P_2–T_1). Данные химического состава пород приведены в табл. 1.

В целом все породные типы Каракольского массива относятся к известково-щелочной серии с почти равными концентрациями Na_2O и K_2O. От ранних фаз к поздним снижается сумма РЗЭ от 182,2 до 51,25 г/т. Соотношения $(La/Yb)_N$ колеблются от 0,37 до 24,6; наиболее низкие свойственны двуслюдяным мелкозернистым лейкогранит-порфирам. Для даек аплитов характерно проявление ТЭФ РЗЭ М-типа (пограничное значение более 1,1; в нашем случае вариации составляют 1,11–1,21) и значительная негативная аномалия по европию (0,08–0,098).

На диаграммах положение фигуративных точек составов пород однозначно указывает на пералюминиевый тип и незначительно меняющиеся соотношения магния и железа вблизи раздела железистой и магнезиальной серий (рис. 2).

В координатах нормированных отношений к хондриту $(La/Yb)_N$ и Yb_N составы породных типов резко отличаются, в основном за счет вариации концентраций Yb (рис. 3).

Двуслюдяные порфировидные граниты главной фазы и дайки аплитов попадают в область нормальных андезитов и низкоалюминиевой тоналит-трондьемит-дацитовой серии пород, а биотитовые лейкограниты и мелкозернистые двуслюдяные лейкограниты – в область адакитовой высокоалюминиевой тоналит-трондьемит-дацитовой серии с разной степенью плавления гранатового амфибо-

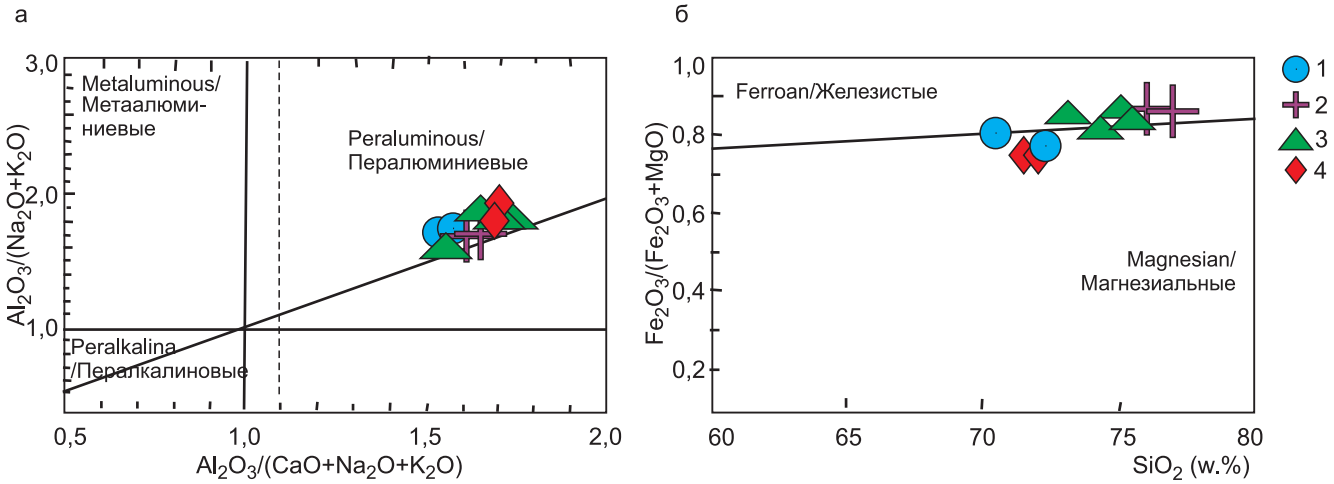

Рис. 2. Диаграммы $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ – $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ (а) по [22] и $Fe_2O_3/(Fe_2O_3 + MgO)$ – SiO_2 (б) по [27] для пород Каракольского массива

1 – гранит-порфиры главной фазы; 2 – жилы аплитов; 3 – лейкогранит-порфиры двуслюдяные; 4 – двуслюдяные гранит-порфиры

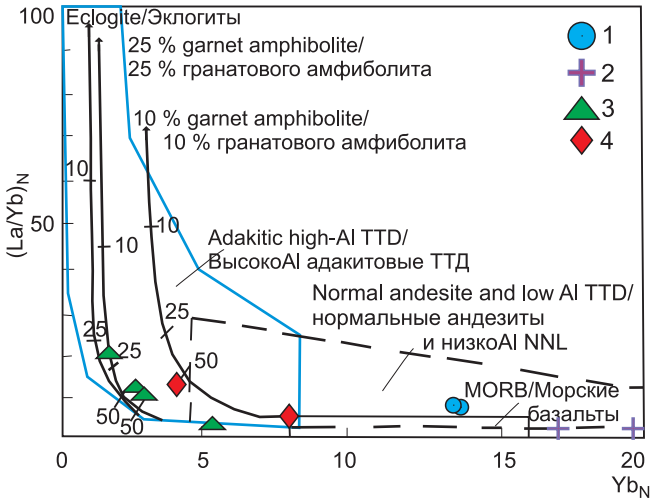

Рис. 3. Диаграмма $(La/Yb)_N$ – Yb_N по [16, 29] для гранитоидов Каракольского массива

Усл. обозн. см. на рис. 2

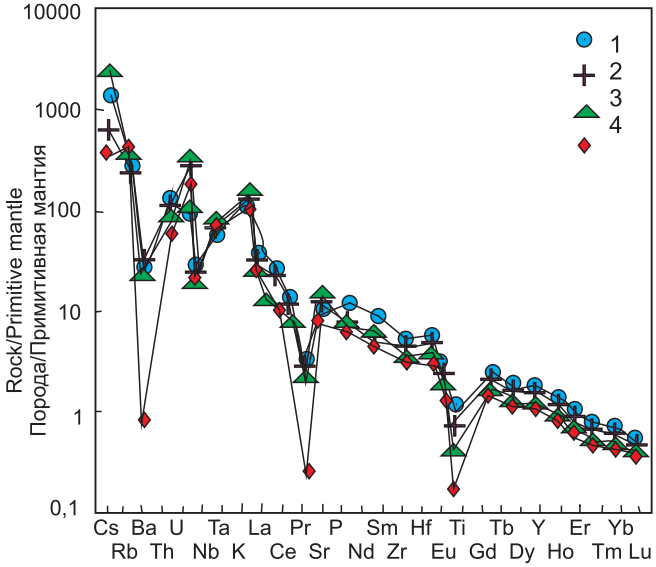

Рис. 4. Нормализованная по примитивной мантии по [24] спайдер диаграмма для химических элементов интрузивных пород Каракольского массива

Усл. обозн. см. на рис. 2

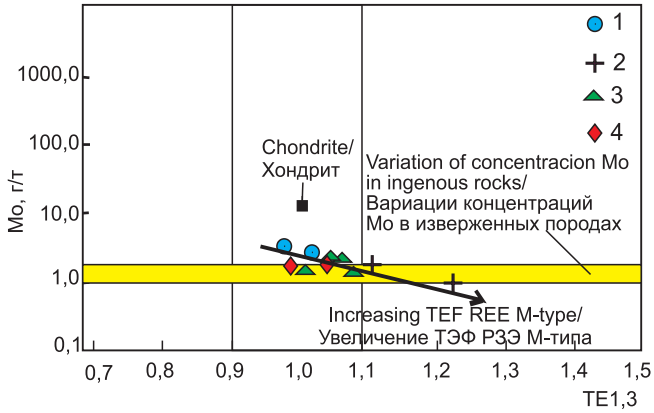

Рис. 5. Диаграмма Mo – $TE_{1,3}$ для магматических пород Каракольского штока. Среднее содержание молибдена в хондритах по [28]. Содержания молибдена в изверженных породах по [2]

1 – двуслюдяные порфировидные граниты главной фазы; 2 – жилы аплитов; 3 – двуслюдяные лейкогранит-порфиры 3-й фазы; 4 – двуслюдяные гранит-порфиры 2-й фазы

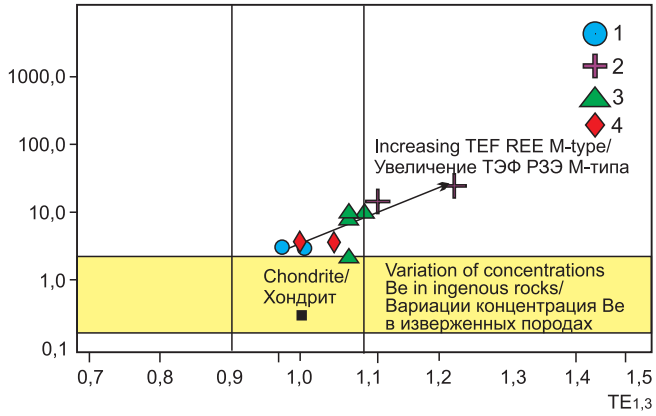

Рис. 6. Диаграмма Be – $TE_{1,3}$ для магматических пород Каракольского штока. Среднее содержание бериллия в хондритах по [28]. Содержания бериллия в изверженных породах по [2]

Усл. обозн. см. на рис. 5

лита: первые – тяготеют к тренду плавления 25 % гранатового амфиболита, а вторые – 10 % гранатового амфиболита. Адакитовая близость лейкогранитов подтверждается и по низким концентрациям иттрия (менее 18 %) и иттербия (ниже 1,8 %), негативной европиевой аномалией (см. табл. 1). На спайдер-диаграмме наблюдается обогащение лейкогранитов крупноионными литофильными элементами (LILE) Cs, Rb, Th, U и деплетирование высокозарядными элементами (HFSE) Nb, Ta, Ti (рис. 4), что также определяет их сходство с адакитами [15]. Обращают на себя внимание повышенные отношения Sr/Y в лейкогранитах (11,04–19,1), что сближает их с породами, имеющими высокое значение Sr/Y [17].

В некоторых породных типах массива проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа, указывающий на значительную роль и активность фтора в магматогенных флюидах. На диаграмме, отражающей соотношение молибдена и значений ТЭФ, отчетливо видна обратная зависимость анализируемых ингредиентов: с увеличением значений ТЭФ РЗЭ М-типа уменьшаются концентрации Mo в породах (рис. 5).

Иная картина наблюдается для соотношений концентраций бериллия и $TE_{1,3}$ в породах Каракольского штока (рис. 6). Концентрации бериллия возрастают с увеличением значения ТЭФ РЗЭ М-типа. Это указывает на то, что перенос Be в пневматолит-гидротермальных флюидах осуществлялся с участием фтор-комплексов, так как проявление ТЭФ РЗЭ М-типа обусловлено активностью фтора во флюидах.

Орудение Каракольского месторождения

Каракольское месторождение представлено серией крутопадающих субширотных кварцевых жил протяженностью 0,3–1,5 км, мощностью от 10 см до 3 м.

Наблюдается тесная пространственная связь рудных жил с двуслюдяными лейкогранитами с преобладанием мусковита, мусковитовыми лейкогранитами и мелкозернистыми двуслюдяными лейкогранитами, которые являются заключительными фазами становления Каракольского штока. Реже кварцевые жилы встречаются в породах экзоконтакта. Рудные минералы в виде рассеянной вкрапленности среди серого и светло-серого крупнозернистого друзовидного кварца, молибденита, висмутина, пирита, халькопирита, берилла, акцессорных шеелита и других редких минералов тяготеют преимущественно к жилам эндоконтактовой зоны и сопровождающим их грейзенам. В самих грейзенах отмечаются также апатит, ортит, ксенотим, ферриколумбит и редкий арсенопирит.

Кварцевые жилы сопровождаются зонами грейзенизации, наиболее отчетливо проявленными при локализации жил среди слабо измененных биотитовых гранитов. При этом внешняя метасоматическая зона в минералогическом (да и в геохимическом) отношении близка к участкам интенсивно мусковитизированных гранитов. Ширина грейзенизации варьирует от 0,5 до 6 м. Как околожильные грейзеновые образования, так и двуслюдяные гранит-порфиры несут редкую вкрапленность рудных минералов – пирита, молибденита, шеелита, еще реже – халькопирита.

Наиболее высокие содержания берилла присущи кварцевым жилам северо-западного простирания, которые приурочены к трещинам скола и сопровождаются процессом грейзенизации гранитов. Жилы сближены до интервала в 2–4 м, расположены кулисообразно; местами лестничные. Берилл развит в виде скоплений неправильной формы, друз и отдельных кристаллов. Различаются две его генерации. Ранняя образует крупные выделения с размерами кристаллов от 0,5 до 5 см голубовато-зеленоватой окраски (формы выделений коротко-призматические и таблитчатые), корродируется халькопиритом, пиритом. Вторая генерация представлена прозрачными светло-голубоватыми кристалликами правильной удлиненно-призматической формы размерами 0,5–15 мм. Иногда кристаллики берилла второй генерации слабо уплощены по {0001}. В комплексных рудах с бериллом ассоциируют молибденит, халькопирит, шеелит, висмутин, ковеллин, торбернит, метаторбернит, отенит, флюорит, турмалин [4]. Впервые в комплексных рудах выявлены редко встречающиеся петалит, ферриколумбит и танталит. Распределение бериллия, молибдена и висмута в таких рудах неравномерное.

Текстурно-структурные исследования в стенках штолен позволили установить, что урановое оруденение в прожилках кварца, кальцита, сидерита с торбернитом, метаторбернитом и отенитом в виде редкой вкрапленности наложено на грейзены и кварцевые жилы с бериллом, халькопиритом и молибденитом, т. е. образовалось позднее основной редкометалльной ассоциации. Местами с урановым оруденением ассоциируют хлорит и флюорит. Околорудные изменения представлены низкотемпературными ассоциациями карбонатов (кальцита, сидерита, анкерита), хлорита и серицита.

Средние содержания рудных компонентов (%) в комплексных рудах следующие: Be 0,5, Mo 0,3, Bi 0,12; суммарные запасы и прогнозные ресурсы (C_1+C_2+P_1): Be – несколько тысяч тонн, причем берилла рудоразборного (C_1+C_2) – 1942 т, Mo – 543,6 т, Bi – 141,2 т, U – 34,2 т. Прогнозные ресурсы категории P_1 не оценены. В сульфидных рудах с пиритом и халькопиритом содержатся Ag (35–100 г/т) и Au (0,4–1,8 г/т).

Местами встречаются линзы слюдитов среди грейзенов мощностью от 10 до 90 см и протяженностью до 3–16 м. В мусковитовых слюдитах с клевеландитом нами впервые обнаружена мелкая вкрапленность ферриколумбита размером 0,02–0,15 мм в ассоциации с шеелитом. По штуфным пробам со-

Таблица 2

Содержания элементов-примесей в мусковите грейзенов Каракольского месторождения (г/т)

Компонент	Номер пробы					
	1	2	3	4	5	6
V	66	57,9	58,9	66	62	59,7
Cr	9,7	9,61	10,1	9,8	9,7	8,6
Ga	93,8	88,1	95,7	189,1	203,2	205,6
Ge	1,24	1,29	1,87	1,29	1,49	1,54
Rb	1250	1320	1540	1258	1327	1336
Sr	9,25	5,7	5,1	9,22	5,5	6,4
Nb	200	192	214	208	212	221
Cs	154	190	194	148	176	183
Ba	167	102	187	156	132	146
Pb	24,7	16,9	15,7	22,9	23,9	24,6
Th	4,65	1,43	2,6	4,9	2,1	3,3
La	8,37	2,53	3,08	8,5	2,88	7,9
Ce	17,3	4,06	5,12	18,1	4,5	17,1
Pr	2,13	0,57	0,67	2,2	0,65	2,1
Nd	7,76	2,1	2,5	7,9	2,8	7,4
Sm	1,85	0,45	0,67	1,94	0,53	1,91
Eu	0,37	0,1	0,12	0,41	0,17	0,4
Gd	1,65	0,33	0,89	1,78	0,41	1,84
Tb	0,26	0,049	0,11	0,33	0,06	0,32
Dy	1,17	0,2	0,7	1,22	0,25	1,31
Ho	0,21	0,053	0,76	0,23	0,06	0,24
Er	0,61	0,14	0,45	0,7	0,21	0,68
Tm	0,086	0,019	0,14	0,092	0,02	0,11
Yb	0,6	0,13	0,55	0,66	0,22	0,62
Lu	0,099	0,025	0,087	0,11	0,03	0,12
Y	6,97	1,59	1,78	7,8	1,86	8,2
Zr	1,1	21,5	20,6	4,8	22,7	5,1
Sc	14,6	12,7	12,3	14,8	12,3	15,1
Hf	1,41	0,37	0,7	1,5	0,45	1,7
Ta	89,9	85,9	88,7	88,5	86,2	91,4
Tl	21,3	18,6	17,4	31,9	32,7	33,2
Mo	73,8	99,5	104	67,8	98,4	73,4
Sb	0,4	0,5	0,3	0,44	0,52	0,5
Sn	13,5	15,7	16,9	15,5	15,9	16,2
Be	15,6	13,2	14,8	11,8	13,7	12,6
W	26,5	49,4	45,8	22,8	45,7	34,2
U	13,5	7,3	8,4	14,2	7,4	15,8
Li	835	786	679	843	782	854
Ag	0,3	0,6	0,6	0,4	0,63	0,5
Bi	10,1	9,5	8,5	10,5	9,8	11,8
Ta/Nb	0,45	0,45	0,41	0,42	0,41	0,43
∑REE	49,44	12,35	17,63	51,97	14,65	50,25
$(La/Yb)_N$	9,2	12,74	3,7	8,51	8,62	8,42
Eu/Eu*	0,64	0,78	0,48	0,67	1,09	0,65
$TE_{1,3}$	1,05	0,87	0,88	1,09	0,85	1,08

Примечания. Анализы выполнены методами эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS и ISP-AES на спектрометре «OPTIMA-4300 в лабораториях ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) и ИМГРЭ (Москва). Нормализация относительно хондрита проведена по [13]. $TE_{1,3}$ – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирберу [17]; Eu* = $(Sm_N+Gd_N)/2$.

держания Nb в слюдитах варьируют от 0,1 до 0,3 %, тантала – от 0,1 до 0,15 %.

В связи с тесной ассоциацией проявления ферриколумбита и мусковита нами проанализирован состав элементов-примесей слюды из грейзенов (табл. 2).

Нормализация концентраций элементов относительно хондрита показала, что в большинстве случаев отношения Eu/Eu* в мусковите ниже хондритовых.

Концентрации некоторых элементов-примесей в мусковите из грейзенов (Nb, Ta, Ga и Cs) в отдельных пробах превышают ферсмы (средние содержания элементов в минерале) мусковита по [11].

Следует отметить проявление ТЭФ РЗЭ W-типа в мусковите грейзенов (пограничное значение менее 0,9), указывающее на то, что при кристаллизации мусковита значительную роль во флюидах играли такие летучие компоненты, как CO_2 и H_2O, обеспечивающие проявление ТЭФ РЗЭ W-типа.

На диаграмме соотношений Ta/Nb – Ta составы мусковита тяготеют к полю танталовых месторождений, гранитов и пегматитов (рис. 7), что указывает на перспективы обнаружения танталового оруденения в районе проявления Каракольского штока.

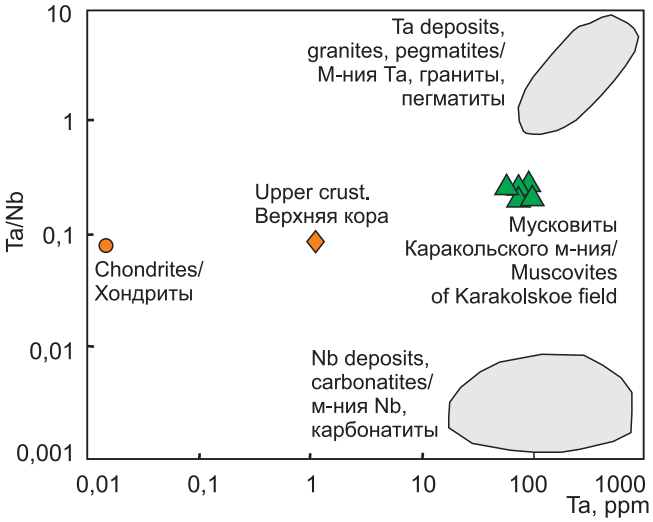

Рис. 7. Диаграмма содержаний Ta и отношений Ta/Nb по [25] для мусковитов Каракольского месторождения (среднее содержание в хондритах по [21], в верхней континентальной коре – по [14])

Концентрации элементов-примесей рудных минералов месторождения приведены в табл. 3.

Примечательно, что в минералах руд проявлены оба типа ТЭФ РЗЭ, что указывает на менявшийся режим насыщения и активности разных летучих компонентов во флюидах: F, CO_2, H_2O, HS^- и др.

Интерпретация результатов

Как уже отмечено, породы Каракольского массива несут в себе признаки различных глубинных магматических источников. Можно сделать вывод о процессах смешения различных родоначальных

Таблица 3

Содержания оксидов и химических элементов в минералах Каракольского месторождения (TiO_2 и MnO в %, остальные компоненты в г/т)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TiO_2	0,018	0,0043	0,026	0,027	0,0035	0,011	0,011	–	–	–
MnO	0,01	0,011	0,55	0,036	0,014	0,025	014	–	–	–
Be	4,26	8,99	30600	33100	2,82	21,5	2,67	33,1	9,6	12,8
V	2,5	2,5	17,6	14,0	2,61	4,02	4,32	3,55	32,1	30,5
Cr	1,0	7,82	11,4	11,8	9,6	4,5	9,97	4,2	9,7	3,8
Ga	1,08	1,36	12,7	14,6	1,089	3,4	2,09	11,7	6,6	12,4
Ge	1,07	3,17	0,46	0,49	0,18	0,15	0,14	3,9	2,8	5,7
Rb	2	2	37,3	53,4	15,8	63	32,1	45,2	8,9	9,6
Sr	1	1,54	17,6	7,36	1	1	4,2	22,1	58	6,3
Y	0,19	0,19	2,63	1,46	2,36	0,74	1,91	1,55	43,4	55,7
Zr	9,44	12,5	15,4	15,8	0,5	8,25	19,1	5,1	19,3	56,9
Nb	0,5	0,5	2,24	5,33	2,25	4,03	7,56	4,8	45,1	–
Mo	15,1	8,44	24,4	9,6	202100	124200	95500	40,4	45,8	22,6
Cs	0,1	0,26	518	793	1,31	4,33	2,27	122,5	18,4	15,3
Ba	4,58	9,43	130	31,2	5,63	11,4	26,8	28,3	30,6	5,8
La	0,18	0,15	4,05	4,96	0,85	0,33	1,3	0,47	7,9	4,2
Ce	0,76	0,47	14,1	8,47	0,01	0,45	4,48	0,89	17,0	16,2
Pr	0,033	0,031	0,87	0,77	0,98	0,68	0,87	0,094	3,8	3,8
Nd	0,2	0,13	3,46	2,53	1,85	0,83	1,69	0,33	9,5	11,1
Sm	0,026	0,031	0,64	0,43	0,24	0,099	0,36	0,24	7,0	4,8
Eu	0,005	0,005	0,18	0,087	0,31	0,22	0,24	0,015	0,33	0,006
Gd	0,032	0,025	0,67	0,31	0,22	0,092	0,21	0,077	8,3	5,8
Tb	0,008	0,01	0,12	0,049	0,038	0,019	0,044	0,024	0,7	2,6
Dy	0,051	0,035	0,61	0,29	0,24	0,095	0,23	0,099	3,5	16,1
Ho	0,0079	0,0063	0,13	0,039	0,054	0,027	0,052	0,03	0,9	4,7
Er	0,019	0,01	0,28	0,13	0,14	0,07	0,18	0,034	3,7	16,2
Tm	0,005	0,005	0,043	0,02	0,028	0,011	0,023	0,0095	0,4	2,3
Yb	0,022	0,022	0,31	0,14	0,13	0,062	0,13	0,069	4,9	14,6
Lu	0,005	0,005	0,065	0,021	0,024	0,0089	0,035	0,15	0,5	0,08
Hf	0,029	0,095	0,28	0,27	0,047	0,033	0,05	0,07	3,5	5,9
Ta	0,1	0,1	0,83	2,23	0,45	0,69	0,68	9,35	19,4	–
W	0,71	0,5	21,9	52,8	23,0	24,7	20,8	61,7	–	16,6
Th	0,1	0,1	0,99	2,38	0,1	0,15	0,22	0,19	11,1	5,9
U	6,73	3,73	1,13	3,15	762	80	4480	0,23	8,2	4,6
Li	–	–	–	–	–	–	–	27456	1,3	5,8
Sc	–	–	–	–	–	–	–	0,44	2,7	42,1
Sn	–	–	–	–	–	–	–	1,8	4,8	1328
Ag	–	–	–	–	–	–	–	0,4	0,3	0,5
Bi	–	–	–	–	–	–	–	2,5	3,1	4,7
∑REE	1,54	1,13	28,16	19,71	7,47	3,73	11,75	4,0	111,8	158,2
$(La/Yb)_N$	5,18	4,36	8,63	23,5	4,28	3,5	6,56	4.51	1,06	0,19
Eu/Eu*	0,54	0,54	0,84	0,7	4,08	6,9	2,48	0,27	0,13	0,003
$TE_{1,3}$	1,32	1,42	1,16	1,09	0,54	1,2	1,47	1,06	0,97	1,49

Примечания. 1, 2 – халькопирит; 3 – берилл 1-й генерации; 4 – берилл 2-й генерации; 5, 6 – молибденит 2-й генерации в кварцевых жилах; 7 – молибденит 1-й генерации в грейзенах; 8 – петалит; 9 – шеелит; 10 – ферриколумбит. Прочерк – анализы не проводились.

магм в глубинном очаге при формировании последовательных фаз Каракольского штока. Вероятно, это сыграло значительную роль и в металлогении рудогенерирующего магматического очага. Следует указать, что в переходной зоне от Бийско-Барнаульской впадины к складчатому сооружению Горного Алтая на раннемезозойском этапе прежде отмечалось совмещение шошонитовых и высоко-

калиевых адакитовых гранитоидов в одних и тех же массивах в составе Айского ареала [3], совмещение двух типов источников расплавов: шошонитового и адакитоподобного при формировании массивов в Точильном ареале [3, 5]; последнее встречается и в зарубежных регионах [20, 23].

Приведенные материалы показывают значительные отличия пород штока от гранитов белокурихинского комплекса. Возможно, следует выделять самостоятельный каракольский гранит-лейкогранитовый комплекс раннетриасового возраста.

Очевидно, смешение различных магматических источников в глубинном магматическом очаге с последующей дифференциацией и привело к формированию комплексного оруденения месторождения, в рудах которого промышленное значение имеют бериллий, молибден, висмут, уран, а также тантал и ниобий. Молибден-бериллиевое оруденение грейзенового типа формировалось на первом этапе. С ним ассоциирует тантал-ниобиевая минерализация. Установлено, что урановое оруденение формировалось позже молибден-бериллиевого и приурочено к жильному типу, наложенному на грейзеновый.

Разнообразие типов оруденения связано с меняющимся флюидным составом на этапе пневматолито-гидротермального и позднего гидротермального этапов и различной активности таких летучих компонентов, как F, CO_2, H_2O, HS^- и др. Менявшийся состав флюидов и летучих компонентов в растворах обусловлен процессами смешения различных по составу магм в глубинном магматическом очаге. Последний эволюционировал сравнительно быстро, о чем свидетельствует прямая зональность в строении Каракольского штока.

Выводы

Каракольское месторождение имеет тесную связь с эволюцией глубинного магматического очага, сформировавшего одноименный шток, а также менявшиеся состав флюидов и летучих компонентов и состав околорудных изменений. Каракольский шток сформировался в результате смешения нормальных андезитов низкоалюминиевой тоналит-трондьемит-дацитовой серии пород и адакитовой высокоалюминиевой тоналит-трондьемит-дацитовой серии с разной степенью плавления гранатового амфиболита. Последующая дифференциация сложного расплава глубинного очага и последующее отделение магматических дифференциатов и флюидных потоков привели к формированию комплексного оруденения.

Промышленное значение на месторождении имеют бериллий, уран, молибден, висмут. Попутно могут извлекаться тантал, ниобий и, возможно, галлий и цезий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бетехтин А. Г.** Минералогия. – М., 1949. – 550 с.

2. **Виноградов А. П.** Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.

3. **Гусев А. И.** Петрогенезис совмещенных шошонитовых и высоко-К адакитовых гранитоидов раннего мезозоя Горного Алтая // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2016. – С. 58–60.

4. **Гусев А. И., Козлова Т. Н.** Бериллиевое оруденение Алтая // Природные ресурсы Горного Алтая: геология, геофизика, экология, минеральные, водные и лесные ресурсы Алтая. – 2009. – № 1. – С. 21–35.

5. **Гусев А. И., Гусев Н. И., Табакаева Е. М.** Абсолютный возраст, петрология, геохимия и рудоносность Точильного штока Горного Алтая // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 3. – С. 14–26.

6. **Кузнецов В. А.** Новые данные по геологии и металлогении Алтая // Вестн. ЗСГУ. – 1941. – № 1–2. – С. 5–63.

7. **Кузнецов В. А.** Тектоническое районирование и основные черты эндогенной металлогении Горного Алтая // Тр. ИГГ СО АН СССР. – 1963. – Вып. 13. – С. 5–28.

8. **Куприянова И. И., Шпанов Е. П., Ануфриева С. И.** Бериллиевые руды России: минерально-сырьевая база, технологические и экологические проблемы // Минеральное сырье. Сер. геолого-экономическая. – 2005. – № 18. – 68 с.

9. **Рудоносность** магматических ассоциаций / В. И. Коваленко, М. Г. Руб, М. А. Осипов и др. – М.: Недра, 1988. – 231 с.

10. **Сотников В. И., Никитина Е. И.** Молибдено-редкометалльно-вольфрамовая (грейзеновая) формация Горного Алтая. – Новосибирск: Наука, 1971. – 260 с.

11. **Средние** содержания элементов-примесей в минералах / В. В. Иванов, В. В. Белевитин, Л. Ф. Борисенко и др. – М.: Недра, 1973. – 208 с.

12. **Станкеев Е. А.** Генетическая минералогия. – М.: Недра, 1986. – 272 с.

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

14. **Barth M. G., McDonough W. F., Rudnick R. L.** Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust // Chem. Geol. – 2000. – Vol. 165. – P. 197–213.

15. **Defant M. J., Drummond M. S.** Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. – 1990. – Vol. 347. – P. 662–665.

16. **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, – P. 21503–21521.

17. **Genesis** of the high Sr/Y rocks in Qinling orogenic belt, central China / L. Ren, H. Liang, Z. Bao et al. // Lithos. – 2018. – Vol. 314–315. – P. 337–349.

18. **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. – P. 489–508.

19. **Ishihara S.** The granitoid series and mineralization // Econ. Geol. – 1981. – 75th Anniversary Volume. – P. 458–484.

20. **Jeong-Im O., Sung H. C., Keewook Y.** Origin of adakite-like plutons in southern Korea // Lithos. – 2016. – Vol. 262. – P. 620–635.

21. **Jochum K., Stolz A., McOrist G.** Niobium and tantalum in the carbonaceous chondrites: constraints on the solar system and primitive mantle niobium/tantalum, zirconium/niobium and niobium/uranium ratios // Meteorit. Planet. Sci. – 2000. – Vol. 35. – P. 229–235.

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

23. **Partial** melting of subducted paleo-Pacific plate during the early Cretaceous: Constraint from adakitic rocks in the Shaxi porphyry Cu–Au deposit, Lower Yangtze River Belt / J. Deng, X. Yang, S. Li et al. // Lithos. – 2016. – Vol. 262. – P. 651–667.

24. **Sun S. S., McDonough W. F.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processed // Magmatism in the oceanic basins (Eds. A.D.Saunders, M.J.Norry). – Geol. Soc. of London Special Publication. – 1989. – No. 42. – P. 313–345.

25. **The key** role of mica during igneous concentration of tantalum / A. Stepanov, J. A. Mavrogenes, S. Meffre, P. Davidson // Contrib. Mineral. Petrol. – 2014. – Vol. 167. – P. 1009.

26. **Vigneresse J. L.** The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation // Ore geology Reviews. – 2007. – Vol. 30. – P. 181–216.

27. **Villaseca C., Barbero L., Herreros V.** A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // Trans. R. Soc. of Edinburg Earth Science. – 1998. – Vol. 89. – P. 113–119.

28. **Wasson J.T., Kallemeyn G. W.** Composition of chondrites // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 1988. – Vol. 201. – P. 535–544.

29. **Xu J.-F., Wang Q., Yu X.-Y.** Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic mélange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust // Geochem. Journ. – 2000. – Vol. 34. – P. 359–377.

REFERENCES

1. Betekhtin A.G. *Mineralogiya* [Mineralogy]. Moscow, 1949. 550 p. (In Russ.).

2. Vinogradov A.P. [The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust]. *Geokhimiya – Geochemistry*, 1962, no. 7, pp. 555–571/ (In Russ.).

3. Gusev A.I. [Petrogenesis of superposed shoshonitic and high-K adakitic granitoids of the Early Mesozoic of the Gorny Altai]. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)* [Geodynamic evolution of lithosphere in the Central-Asian mobile belt (from ocean to continent)]. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust Publ., 2016, p. 5860. (In Russ.).

4. Gusev A.I., Kozlova T.N. [Beryllium ore mineralization of Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya: geologiya, geofizika, ekologiya, mineral'nye, vodnye i lesnye resursy Altaya* [Natural resources of the Gorny Altai: geology, geophysics, ecology, mineral, water and forest resources of Altai], 2009, no. 1, pp. 21–35. (In Russ.).

5. Gusev A.I., Gusev N.I., Tabakaeva E.M. [Absolute age, petrology, geochemistry and ore mineralization of the Tochilny stock in the Gorny Altai]. *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 14–26. (In Russ.).

6. Kuznetsov V.A. [New data on geology and metallogeny of Altai]. *Vestnik ZSGU*, 1941, no. 1–2, pp. 5–63. (in Russ.).

7. Kuznetsov V.A. [Tectonic zoning and essentials of endogenous metallogeny in the territory of the Gorny Altai]. *Trudy IGG CO AN SSSR*, 1963, vol. 13, pp. 5–28. (In Russ.).

8. Kupriyanova I.I., Shpanov Ye.P., Anufriyeva S.I. [Berillium ores of Russia: mineral resources base, technological and ecological problems]. *Mineralnoye syrye. Ser. geologo-ekonom.* [Mineral Raw Materials. Geological-economical series]. Moscow, VIMS Publ., 2005, no. 18. 68 p. (In Russ.).

9. Kovalenko V.I., Rub M.G., Osipov M.A., et al. *Rudonosnost magmaticheskikh assotsiatsii* [Ore potential of igneous associations]. Moscow, Nedra, 1988. 231 p. (In Russ.).

10. Sotnikov V.I., Nikitina E.I. *Molibdeno-redkometallno-volframovaya (greyzenovaya) formatsiya Gornogo Altaya* [Molybdenum–rare-metal–tungsten (greisen) formation of the Gorny Altai]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1971. 260 p. (In Russ.).

11. Ivanov V.V., Belevitin V.V., Borisenko L.F., et al. *Sredniye soderzhaniya elementov-primesey v mineralakh* [Average contents of accompanying elements in minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 208 p. (In Russ.).

12. Stankeev E.A. *Geneticheskaya mineralogiya* [Genetic mineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 272 p. (In Russ.).

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

14. Barth M.G., McDonough W.F., Rudnick R.L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chem. Geol.*, 2000, vol. 165. – P. 197–213.

15. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, vol. 347, pp. 662–665.

16. 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.

17. Ren L., Liang H., Bao Z., et al. Genesis of the high Sr/Y rocks in Qinling orogenic belt, central China. *Lithos*, 2018, vol. 314–315, pp. 337–349.

18. 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. 489–508.

19. Ishihara S. The granitoid series and mineralization. *Econ. Geol*., 1981, 75th Anniversary Volume, pp. 458–484.

20. Jeong-Im O., Sung H.C., Keewook Y. Origin of adakite-like plutons in southern Korea. *Lithos*, 2016, vol. 262, pp. 620–635.

21. Jochum K., Stolz A., McOrist G. Niobium and tantalum in the carbonaceous chondrites: constraints on the solar system and primitive mantle niobium/tantalum, zirconium/niobium and niobium/uranium ratios. *Meteorit. Planet. Sci*., 2000, vol. 35, pp. 229–235.

22. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull*., 1989, vol. 101, pp. 635–643.

23. Deng J., Yang X., Li S., et al. Partial melting of subducted paleo-Pacific plate during the early Cretaceous: Constraint from adakitic rocks in the Shaxi porphyry Cu–Au deposit, Lower Yangtze River Belt. *Lithos*, 2016, vol. 262, pp. 651–667.

24. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processed. *Magmatism in the oceanic basins* (Eds. A.D.Saunders, M.J.Norry). *Geol. Soc. of London Spec. Publ.*, 1989, no. 42, pp. 313–345.

25. Stepanov A., Mavrogenes J.A., Meffre S., Davidson P. The key role of mica during igneous concentration of tantalum. *Contrib. Mineral. Petrol*., 2014, vol. 167, pp. 1009.

26. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore geology Reviews*, 2007, vol. 30, pp. 181–216.

27. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Trans. R. Soc. of Edinburg Earth Science*, 1998, vol. 89, p. 113–119.

28. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond*., 1988, vol. 201, pp. 535–544.

29. Xu J.-F., Wang Q., Yu X.-Y. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic mélange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust . *Geochem. Journ*., 2000, vol. 34, pp. 359–377.

© А. И. Гусев, 2020