

УДК 553.3/4:553.2:550.4

**КАРАКОЛЬСКАЯ УРАН-РЕДКОМЕТАЛЛЬНАЯ МАГМО-РУДНО-
МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГОРНОГО АЛТАЯ**

Гусев А.И.

*профессор кафедры естественно-научных дисциплин, безопасности жизнедеятельности
и туризма, доктор геолого-минералогических наук, Алтайский государственный
гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукина, г. Бийск, E-mail -*

anzerq@mail.ru

Известия АО РГО, 2019- №2 (53). – С. 27-42

Приведены новые данные о строении и составе магматических, рудных образований и околорудных метасоматических изменений комплексного Каракольского месторождения Горного Алтая. Одноименный шток гранитоидов имеет зональное строение и 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 низко-алюминиевого и высоко-алюминиевого адакитового с различной степенью частичного плавления гранатового амфиболита. В породах проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М- типа. Концентрации бериллия в породах повышаются с увеличением величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М- типа, что обусловлено переносом металла комплексными соединениями фтора в магматогенных флюидах. Приведенные данные позволяют выделить шток в самостоятельный каракольский гранит-лейкогранитовый комплекс ранне-триасового возраста. Оруденение представлено кварцево-грейзеновым типом с бериллом, молибденитом, халькопиритом, пиритом, висмутином. По изотопам серы, углерода и кислорода установлены мантийный и коровый источники оруденения. 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, изотопы серы, углерода, кислорода, бериллий, молибден, медь, висмут, тантал, ниобий, уран.

Введение

В Горном Алтае имеется ряд перспективных месторождений различных металлов, которые изучались ещё в середине прошлого века. К числу таких месторождений относится комплексное уран-редкометалльное Каракольское месторождение. Необычность состава руд месторождения и давность его изучения послужили причиной для ревизионных работ на нём с целью использования современных лабораторных исследований руд и магматических образований. Автором в период 2015-2018 годов на месторождении проведены полевые работы и лабораторные исследования магматитов и руд, результаты которого и стали предметом данного сообщения.

Актуальность проведенных исследований не вызывает сомнений, так как Каракольское месторождение входит в перечень месторождений, учтённых Государственным балансом России по бериллию (из числа 11 объектов по России) [1], а также потому, что оно - единственное месторождение на Алтае, в рудах которого присутствуют одновременно урановое и редкометалльное оруденение.

Цель исследования – провести полевые ревизионные работы, специализированное металлогеническое исследование и анализ современными прецизионными лабораторными методами магматических пород, руд, минералов и околорудных изменений Каракольского месторождения.

Известно, что бериллиевое и молибденовое грейзеновое оруденение связано с гранитоидным магматизмом [1, 2, 3], который обладает специфическими особенностями.

Магматизм месторождения

Интрузивно-связанные рудные месторождения грейзенового типа представляют собой динамически связанные магматические тела, рудные образования и околорудные метасоматические изменения. К такому типу относится и Каракольское месторождение.

Каракольское месторождение находится на водоразделе рек Усть-Куча, Колбалы и Солоновки. Оно было открыто и впервые изучено В. А. Кузнецовым (1941). Впоследствии оно изучалось А. И. Александровым (1947), В. А. Золотаревым, Я. А. Косалсом, В.И. Сотниковым, Е.И. Никитиной (1971).

Приурочено месторождение к одноименному интрузивному массиву площадью около 36 км². В его составе определены гранит-порфиры, лейкогранит-порфиры, биотитовые, мелкозернистые двуслюдяные лейкогранит-порфиры и жилы аплитов и редко аляскистов.

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 успевают закристаллизоваться и более поздние фазы их легко прорывают и располагаются в центре plutонов с формированием нормальной зональности по [4]. Такому сценарию отвечает формирование интрузивных фаз Каракольского штока (рис. 1).

Гранит-порфиры главной фазы имеют порфировидный облик, они серые с розоватым оттенком. Структура породы порфировая, основной ткани породы - гипидиоморфно-зернистая. Порфировые вкрапленники представлены плагиоклазом, реже калиевым полевым шпатом. Основная ткань породы сложена кварцем, плагиоклазом 2 генерации, калиевым полевым шпатом, биотитом, мусковитом, редко роговой обманкой, эпидотом. Плагиоклаз вкрапленников 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 каёмки до 0,05 мм шириной. Плагиоклаз 2 генерации коротко-призматический или таблитчатый относится к олигоклаз-андезину № 27-32. Амфибол определён как обыкновенная роговая обманка, которая часто замещается эпидотом и хлоритом.

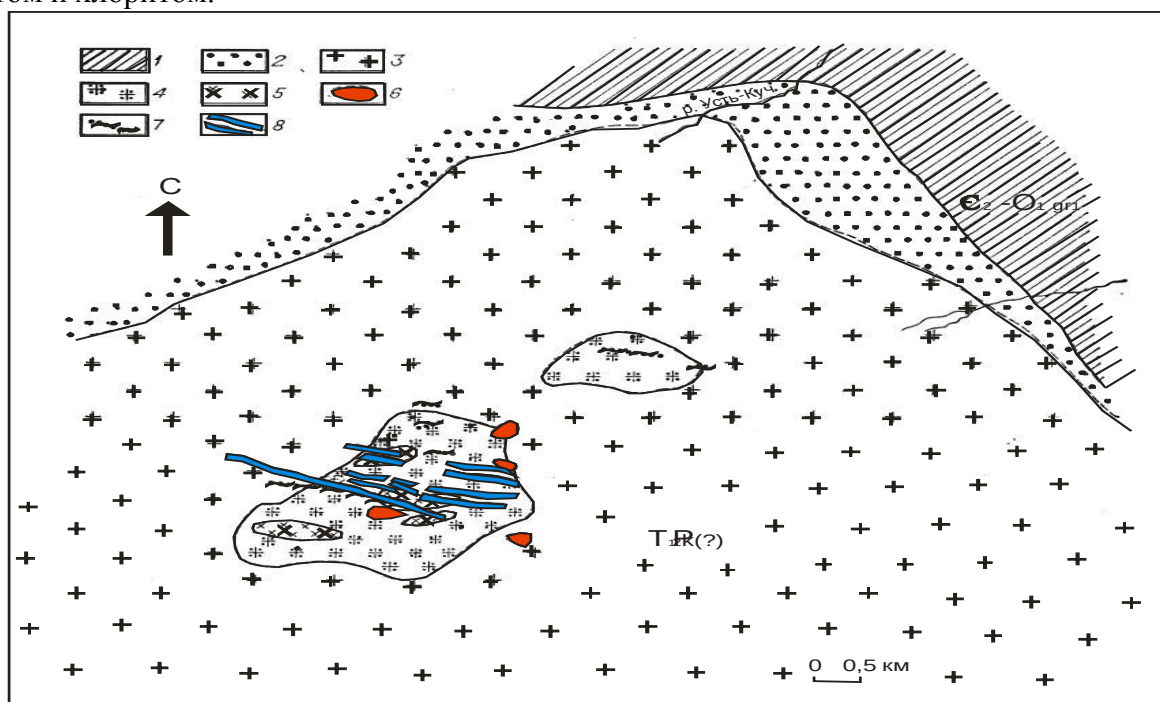


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Каракольского месторождения (составлена автором с учётом данных ГРП)

1- Песчаники, алевролиты и аргиллиты горно-алтайской серии; 2- роговики; гранитоиды Каракольского штока; 3- двуслюдяные граниты с преобладанием биотита 2 фазы; 3 фаза: 4- двуслюдяные лейкограниты с преобладанием мусковита; 5 – мусковитовые лейкограниты; 6 – мелкозернистые двуслюдяные лейкогранит-порфиры; 7 – дайки аплитов и аляскитов; 8 – кварцево-грейзеновые жилы.

Из аксессуаров в гранит-порфирах присутствуют (г/т): магнетит (от 50 до 400), сфен (от 20 до 500), циркон (от 20 до 400), апатит (от 14 до 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 [5].

Мелкозернистые лейкогранит-порфиры розовато-серые и светло-серые двуслюдяные массивные, местами неравномернозернистые 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 полево шпате проявлена «микроклиновая решётка». 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 непротяжённые (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. Характерно скопление жил аплитов в районе Каракольского месторождения и в гранитоидах главной фазы.

Возраст гранитов 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 таблице 1.

Таблица 1

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

Компо- ненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO₂	71,31	73	72,7	72,5	73,6	74,2	73,7	74,8	75,8	76,2
TiO₂	0,24	0,25	0,17	0,19	0,11	0,09	0,12	0,093	0,042	0,03
Al₂O₃	14,49	14,1	14,6	14,53	14,7	14,6	14,4	13,7	13,7	13,64
Fe₂O₃	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
Na₂O	4,04	3,02	3,57	3,8	3,8	3,76	3,77	3,72	4,48	4,42
K₂O	3,94	4,71	4,07	4,1	4,07	4,12	3,85	4,13	3,54	3,62
P₂O₅	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
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
ΣREE	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

Примечание. Анализы выполнены методами эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS и ISP-AES на спектрометре «OPTIMA-4300 в

Лабораториях ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) и ИМГРЭ (г. Москва). Нормализация относительно хондрита проведена по [6]. $TE_{1.3}$ – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [7]; $Eu^* = (Sm_N + Gd_N)/2$. 1-2- гранит-порфиры главной фазы; 2-3- жилы аплитов; 5-8- лейкогранит-порфиры биотитовые; 9-10 – мелкозернистые двуслюдяные лейкогранит-порфиры.

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 происходит снижение суммы РЗЭ от 182,2 до 51,25 г/т. Варьирование соотношений $(La/Yb)_N$ колеблется от 0,37 до 24,6. Наиболее низкие соотношения свойственны двуслюдяным мелкозернистым лейкогранит-порфирам. Для даек аплитов характерно проявление ТЭФ РЗЭ М- типа (от 1,11 до 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 варьирующее соотношение магния и железа вблизи раздела железистой и магнезиальной серий (рис. 2).

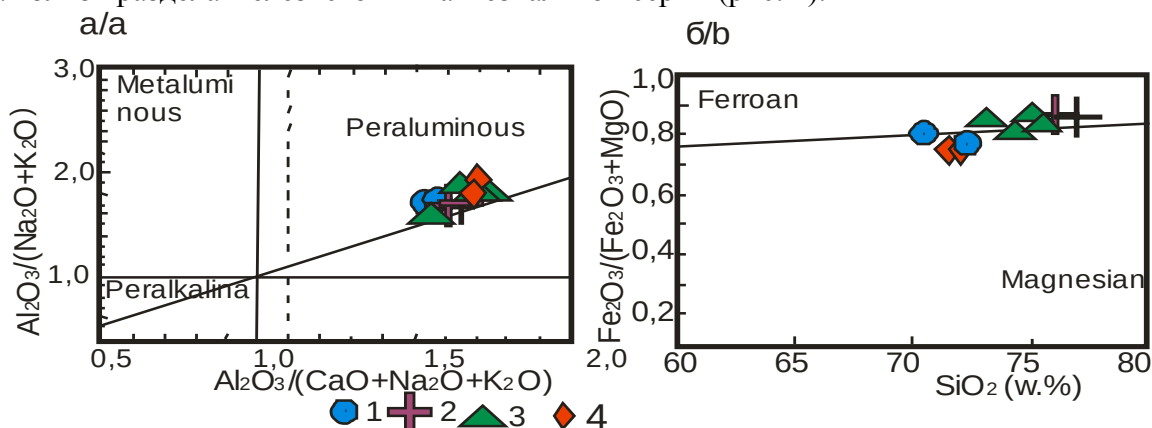


Рис. 2. Диаграммы $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O) - Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ (а) по [8] и $Fe_2O_3/(Fe_2O_3 + MgO) - SiO_2$ (б) по [9] для пород Каракольского массива

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

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

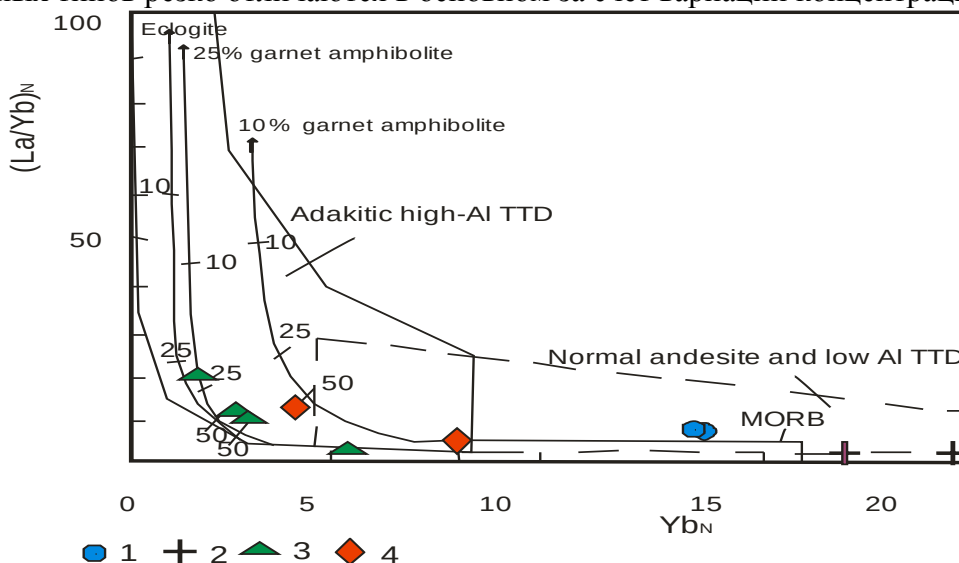


Рис. 3. Диаграмма $(La/Yb)_N - Yb_N$ по [4, 9, 10, 11] для гранитоидов Каракольского массива Adakitic high-Al TTD – адакиты высоко-Al тоналит-трондьемит-дацитовые; Normal andesite and low-Al TTD – нормальные андезиты и низко-Al тоналит-трондьемит-дацитовые. MORB

– океанические базальты из офиолитового блока пояса Мина-Лью по [9]; eclogite – эклогиты; 25 % garnet amphibolites – 25 % гранатового амфиболита; 10 % garnet amphibolites – 10 % гранатового амфиболита.

Условные те же, что на рис. 2.

Гранит-порфиры главной фазы и дайки аплитов попадают в область нормальных андезитов и низко алюминиевой тоналит-трондьемит-дацитовый серии пород, а биотитовые лейкограниты и мелкозернистые двуслюдяные лейкограниты – в область адакитовой высоко алюминиевой тоналит-трондьемит-дацитовый серии с разной степенью плавления гранатового амфиболита: первые – тяготеют к тренду плавления 25 % гранатового амфиболита, а вторые – 10 % гранатового амфиболита. Адакитовую близость лейкограниты обнаруживают и по низким концентрациям иттрия (менее 18 %) и иттербия (ниже 1,8 %), негативной европиевой аномалией (табл. 1). На спайдер-диаграмме наблюдается обогащение лейкогранитов крупно-ионными литофильными элементами (LILE) – Cs, Rb, Th, U и деплетирование высоко-зарядными элементами (HFSE) – Nb, Ta, Ti (рис. 4), что также определяет их сходство с адакитами [10]. Обращают на себя внимание повышенные отношения Sr/Y в лейкогранитах, варьирующие от 11,04 до 19,1, что сближает их с высоко - Sr/Y породами [12].

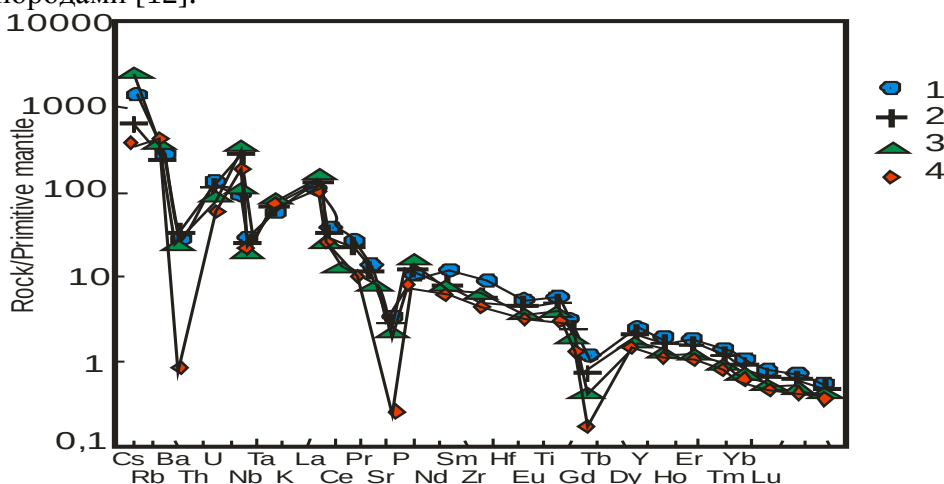


Рис. 4. Нормализованная по примитивной мантии по [13] спайдер диаграмма для химических элементов интрузивных пород Каракольского массива

Условные те же, что на рис. 2.

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 величин ТЭФ РЗЭ М- типа отчётливо видна обратная зависимость анализируемых ингредиентов: с увеличением значений ТЭФ РЗЭ М-типа происходит уменьшение концентраций Мо в породах (рис. 5).

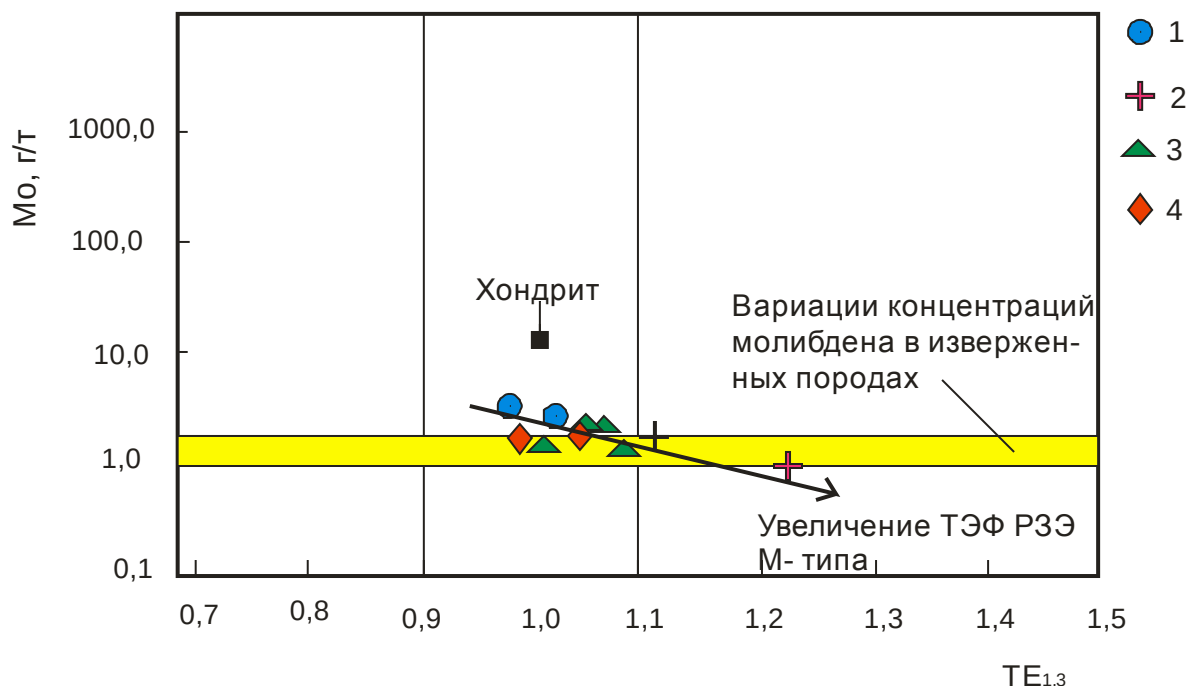


Рис. 5. Диаграмма Мо – $TE_{1,3}$ для магматических пород Каракольского штока
Среднее содержание молибдена в хондритах по [14]. Содержания молибдена в изверженных породах по [15].

1 – граниты главной фазы, 2- жилы аплитов, 3- двуслюдяные лейкогранит-порфиры 3 фазы, 4- двуслюдяные гранит-порфиры 2 фазы.

Иная картина наблюдается для соотношений концентраций бериллия и $TE_{1,3}$ в породах Каракольского штока (рис. 6). Увеличение концентраций бериллия происходит с увеличением величины 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.

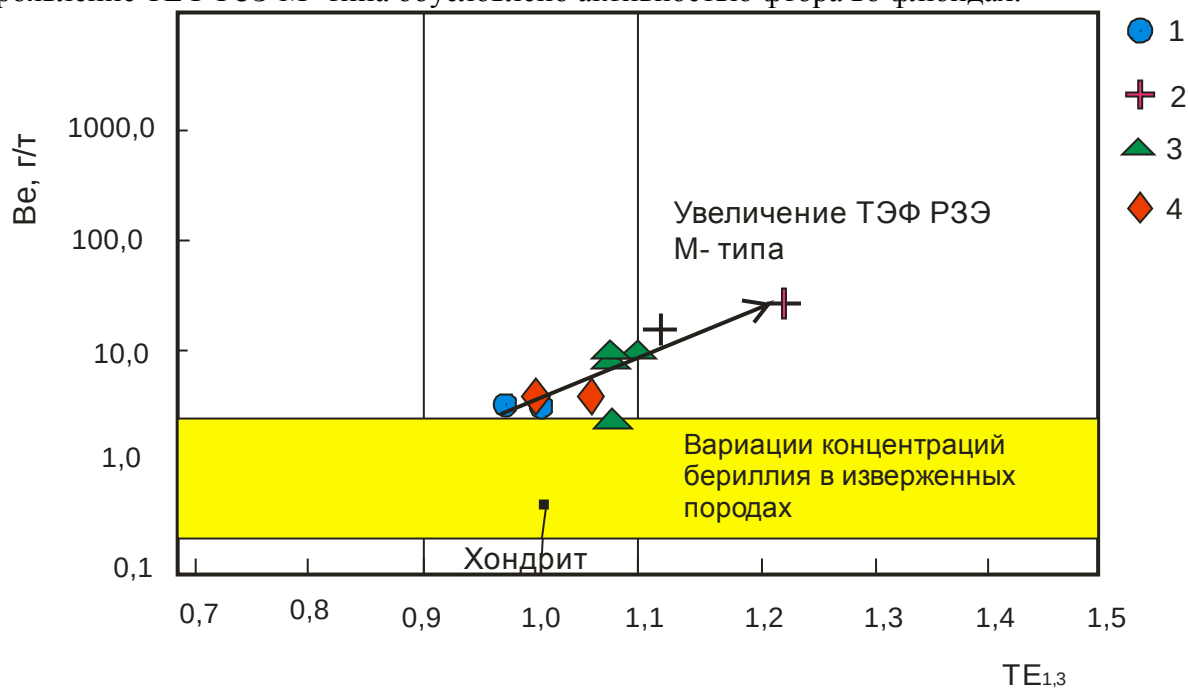


Рис. 6. Диаграмма Be – $TE_{1,3}$ для магматических пород Каракольского штока
Среднее содержание бериллия в хондритах по [14]. Содержания бериллия в изверженных породах по [15]. Условные те же, что на рис. 5.

Оруденение Каракольского месторождения

Каракольское месторождение представлено серией крутопадающих субширотных: кварцевых жил протяжённостью от 0,3 до 1,5 км. Мощность жил варьирует от 10 см до 3 м.

Наблюдается тесная пространственная связь рудных жил с двуслюдяными лейкогранитами с преобладанием мусковита, мусковитовыми лейкогранитами и мелкозернистыми двуслюдяными лейкогранитами, являющимися заключительными фазами становления Какаракольского штока. Реже кварцевые жилы встречаются в породах экзоконтакта. Рудные минералы в виде рассеянной вкрапленности среди серого и светло-серого крупнозернистого друзовидного кварца молибденита, висмутита, пирита, халькопирита, берилла, акцессорных шеелита и других редких минералов тяготеют преимущественно к жилам эндоконтактовой зоны и сопровождающим их грейzenам. В самих грейzenах 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 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, редко – халькопирита.

Наиболее высокие содержания берилла присущи кварцевым жилам СЗ 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. Различимы 2 генерации берилла. Ранняя образует крупные выделения с размерами кристаллов от 0,5 до 5 см. голубовато-зеленоватой окраски. Формы его выделений коротко-призматические и таблитчатые. Первая генерация берилла корродируется халькопиритом, пиритом. Вторая генерация представлена прозрачными светло-голубоватыми кристалликами правильной удлиненно-призматической формы размерами от 0,5 до 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 [16]. Впервые в комплексных рудах выявлены редко встречающиеся петалит, ферриколумбит и танталит. Распределение берилла, молибдена и висмута в таких рудах неравномерное.

Текстурно-структурные исследования в стенках штолен позволили установить, что урановое оруденение в виде прожилков кварца, кальцита, сидерита с торбернитом, метаторбернитом и отенитом в виде редкой вкрапленности наложены на грейzenы и кварцевые жилы с бериллом, халькопиритом и молибденитом, то есть, оно образовалось позднее основной редкометалльной ассоциации. Местами с урановым оруденением ассоциируют хлорит и флюорит. Околорудные изменения представлены низко-температурными ассоциациями карбонатов (кальцита, сидерита, анкерита), хлорита и серицита.

Среднее содержание рудных компонентов (%) составляет в комплексных рудах: Be – 0,5, Mo – 0,3, Bi – 0,12. Суммарные запасы и прогнозные ресурсы ($C_1+C_2+P_1$) Be – несколько тысяч тонн, причём, берилла рудоразборного (C_1+C_2) – 1942 т, Mo – 543,6 т, Bi – 141,2 т, U – 34,2 т. В сульфидных рудах с пиритом и халькопиритом содержатся Ag – от 35 до 100 г/т и Au (0,4-1,8 г/т).

Местами встречаются линзы слюдитов среди грейzenов мощностью от 10 до 90 см и протяжённостью до 3-16 м. В мусковитовых слюдитах с клеветландитом нами впервые обнаружена мелкая вкрапленность ферриколумбита размерами 0,02-0,15 мм в ассоциации

с шеелитом. По штучным пробам содержания Nb в слюдитах варьируют от 0,1 до 0,3 %, тантала – от 0,1 до 0,15%.

Для определения некоторых физико-химических параметров проведены термо-баро-геохимические исследования минералов руд и жильных образований Каракольского месторождения, которые сведены в табл. 2.

Таблица 2

Термо-баро-геохимические и изотопные данные исследований минералов Каракольского месторождения

Минерал	n	T _{гом.} , °C	Солёность, масс. %-экв.	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ PDB	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW
Мусковит из грейзенов	3	340-350	23-25	-	-	-
Мусковит из слюдитов	4	350-375	24,4-25,5	-	-	-
Кварц из грейзенов	5	350-380	27,8-28,7	-	-	-
Пирит из грейзенов с бериллиевым оруденением	2	-	-	(-1,3) – (-1,6)	-	-
Халькопирит из грейзенов с молибденовым оруденением	2	-	-	(+3,5) - (+5,1)	-	-
Молибденит из грейзенов	3	-	-	(+2,3) – (+3,6)	-	-
Сидерит из грейзенов с урановым оруденением	3	220-230	11-13	-	(-6,4) – (-6,8)	15,3-16,2
Кальцит из прожилков с урановым оруденением	3	160-175	6,8-7,3	-	(-1,3) - (-1,8)	19,3-20,1

Примечание.. Изотопный состав серы, кислорода и углерода определён на масс-спектрометре МИ 1201В в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск).

Температуры гомогенизации первичных газово-жидких включений в мусковитах и кварце грейзенов варьируют от 340 до 380 °C, указывая на типичную температуру грейзенового процесса. Солёность растворов, формировавших грейзеновые ассоциации была очень высокой, приближаясь к условиям их насыщения (23 – 28,7 масс. %-эквивалента NaCl).

Для уранового оруденения, сопровождавшегося прожилками карбонатов, температуры гомогенизации первичных газово-жидких включений были значительно ниже (160-230 °C) и со значительно более низкой солёностью растворов (6,8-13 масс. %-эквивалента NaCl).

Особенности генезиса оруденения выявляются при анализе данных стабильных изотопов: серы, углерода и кислорода в различных минералах месторождения.

Величины $\delta^{34}\text{S}$ варьируют от -1,3 до +5,1. Низкие значения свойственны пириту из грейзенов, а повышенные – халькопириту и молибдениту. Эти значения обычно интерпретируются магматическим источником серы [17].

Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в сидеритах и кальцитах жильных образований уранового оруденения свидетельствуют о смешанном их характере - ювенильно-коровом (рис. 7).

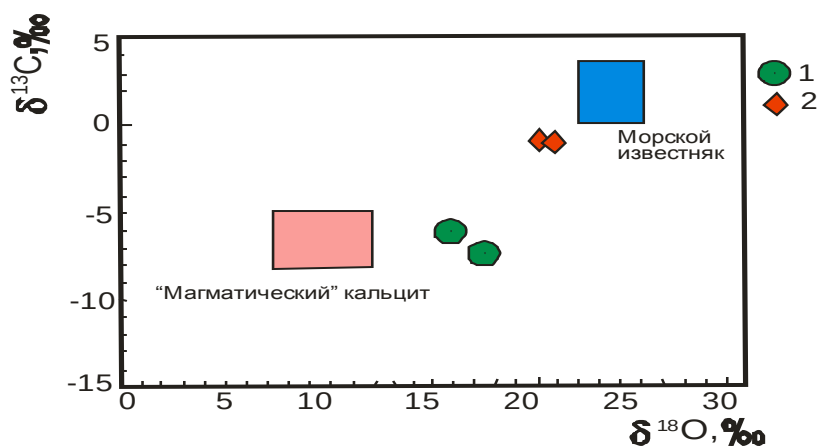


Рис. 7. Диаграмма соотношений $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатов Каракольского месторождения

Цветные поля для «магматического» кальцита и морского известняка на диаграмме выделены по данным [17, 18]. Минералы Каракольского месторождения: 1- сидерит, 2- кальцит.

В то же время значения изотопных меток углерода раннего сидерита близок к составу «концентрированной» изотопно «тяжёлой» ($\delta^{13}\text{C} = -7,3 \text{ ‰}$) по [19] фазы мантийного углерода. Это также подтверждает предположение о возможном источнике и трансмагматических флюидов в коровом рудогенезе Каракольского месторождения.

В связи с тесной ассоциацией проявления ферриколумбита и мусковита нами проанализирован состав элементов-примесей слюды из грейзенов, представленный в таблице 3.

Таблица 3

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

Компоненты	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
ΣREE	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

Примечание. Анализы выполнены методами эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS и ISP-AES на спектрометре «OPTIMA-4300» в Лабораториях ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) и ИМГРЭ (г. Москва). Нормализация относительно хондрита проведена по [6]. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [7]; Eu* = (Sm_N + Gd_N)/2.

Концентрации некоторых элементов-примесей в мусковите из грейзенов (Nb, Ta, Ga и Cs) в отдельных пробах превышают ферсмы мусковита по [20].

Следует отметить проявление ТЭФ РЗЭ W- типа в мусковите грейзенов (менее 0,9), указывающее на то, что при кристаллизации мусковита значительную роль во флюидах играли такие летучие компоненты как CO₂ и H₂O, обеспечивающие проявление W- типа тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов.

На диаграмме соотношений Ta/Nb – Ta составы мусковита тяготеют к полю танталовых месторождений, гранитов и пегматитов (рис. 8), что указывает на перспективы обнаружения танталового оруденения в районе проявления Каракольского штока.

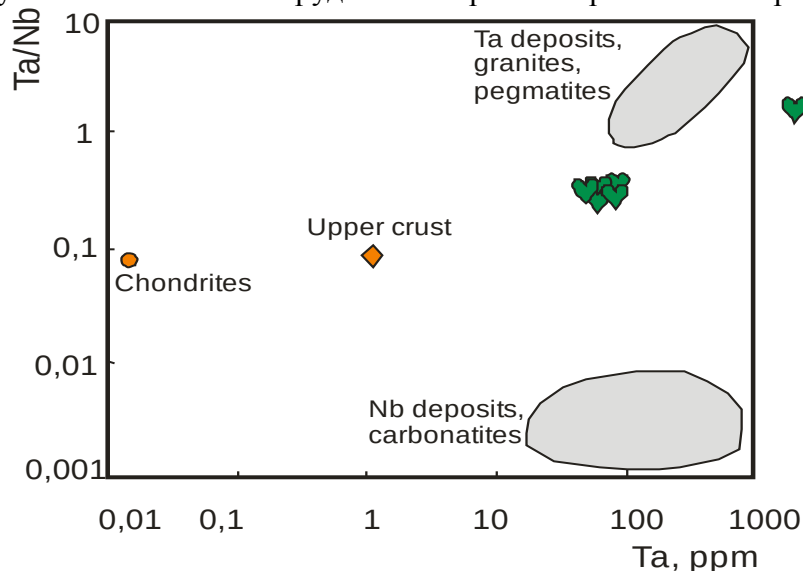


Рис. 8. Диаграмма содержаний Ta и отношений Ta/Nb по [21] для мусковитов грейзенов Каракольского месторождения

Резервуары Земли: Chondrites – среднее содержание в хондритах по [22]; Ta deposits, granites, pegmatites – поле Ta месторождений, гранитов, пегматитов; Upper crust – среднее содержание в верхней континентальной коре по [23]; Nb deposits, carbonatites – значения в Nb месторождениях и карбонатитах.

1 - мусковиты грейзенов Каракольского месторождения.

Концентрации элементов-примесей рудных минералов месторождения представлен в табл. 4.

Таблица 4

Состав минералов Каракольского месторождения (TiO₂ и MnO в %, остальные элементы в г/т)

Компо- ненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TiO₂	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	0,014	-		-
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
ΣREE	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

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

Примечателен тот факт, что в минералах руд проявлен как М- тип ТЭФ РЗЭ, так W – тип, что указывает на менявшийся режим насыщения и активности разных летучих компонентов во флюидах: F, CO₂, H₂O, HS⁻ и других.

Обсуждение полученных результатов

Как отмечено выше, породы Каракольского массива несут в себе признаки различных глубинных магматических источников и можно сделать вывод о процессах смешения различных родоначальных 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 ранее отмечалось в ранне-мезозойском этапе совмещение шошонитовых и высококалийевых адакитовых гранитоидов в одних и тех же массивах в составе Айского ареала [24], совмещение двух типов источников расплавов: шошонитового и адакито-подобного при формировании массивов в Точильном ареале [25]. Совмещение шошонитового и адакито-подобного расплавов отмечено и в других регионах зарубежья [26, 27].

Приведенные материалы показывают значительные отличия пород штока от гранитов Белокурихинского комплекса и возможно следует выделять самостоятельный каракольский гранит-лейкогранитовый комплекс ранне-триасового 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. Основное кварцево-грейзеновое молибден-бериллиево оруденение 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 кварцево-грейзеновый тип.

Разнообразие типов оруденения связано с меняющимся флюидным режимом на этапе пневматолито-гидротермального и позднего гидротермального этапов и различной активностью таких летучих компонентов, как F, CO₂, H₂O, HS⁻ и других. Менявшийся режим флюидов и летучих компонентов в растворах, обусловлен процессами смешения различных по

составу магм в глубинном магматическом очаге. Последний эволюционировал сравнительно быстро, о чём свидетельствует прямая зональность в строении Каракольского штока.

Заключение

Каракольское месторождение имеет тесную связь с эволюцией глубинного магматического очага, сформировавшего одноименный шток, менявшиеся состав флюидов и летучих компонентов, состав околорудных изменений. Каракольский шток сформировался в результате смешения нормальных андезитов низко алюминиевой тоналит-трондjemит-дацитовый серии пород и адакитовой высоко алюминиевой тоналит-трондjemит-дацитовый серии с разной степенью плавления гранатового амфиболита. Последующая дифференциация сложной расплава глубинного очага и дальнейшее отделение магматических дифференциатов и флюидных потоков привели к формированию комплексного оруденения. По изотопии стабильных изотопов серы, углерода и кислорода выявлены признаки мантийных и коровых ингредиентов, участвовавших в генерации руд месторождения. Значительные отличия пород от таковых Белокурихинского комплекса позволяют отнести шток к самостоятельному каракольскому комплексу.

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

Список литературы

1. Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Ануфриева С.И. Бериллиевые руды России: минерально-сырьевая база, технологические и экологические проблемы. «Минеральное сырьё». Серия геолого-экономическая, № 18. – М.: Изд-во ВИМС, 2005. – 68 с.
2. Рудоносность магматических ассоциаций. /Коваленко В.И., Руб М.Г., Осипов М.А. и др. – М.: Недра, 1988. - 231 с.
3. Станкеев Е.А. Генетическая минералогия. - М.: Недра, 1986. – 272 с.
4. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation // Ore geology Reviews.- 2007. – V. 30. – P. 181-216.
5. Ishihara S. The granitoid series and mineralization // Econ. Geology. - 1981. - 75 -th Anniversary Volume. - P.458-484.
6. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // Geochim. Cosmochim. Acta., 1989. - V.53. - P. 197-214.
7. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochim Cosmochim Acta. - 1999. - V.63. - № 3/4. - P. 489-508.
8. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geological Soc. America Bulletin. – 1989. – V. 101. – P. 635–643.
9. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science. –1998. – V. 89. – P. 113–119.
10. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere //Nature, 1990. – V.347. – P. 662—665.
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. Ren L., Liang H., Bao Z., Zhang J., Li K., Huang W. Genesis of the high Sr/Y rocks in Qinling orogenic belt, central China // Lithos, 2018. – V. 314-315. – P. 337-349.
13. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Magmatism in the oceanic basins (Saunders A.D., Norry M.J. Eds) Geol. Soc of London Special Publication, 1989. - № 42. – P. 313-345.
14. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites // Phil. Trans. R. Soc. Lond, 1988. – V. 201. – P. 535-544.

15. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия, 1962. - № 7. - С. 555-572.
16. 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.
17. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon // Geochemistry of hydrothermal ore deposits. N.Y.: Wiley Interscience, 1979. P. 509-567.
18. Porter T.M. Hydrothermal Iron Oxide Copper Gold and Related Deposits: A Global Perspective. – 2000. PGC Publishing Adelaide. - 350 p.
19. Галимов, Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. – М.: Недра, 1968. – 222 с.
20. Иванов В.В., Белевитин В.В., Борисенко Л.Ф. и др. Средние содержания элементов-примесей в минералах. – М.: «Недра», 1973. – 208 с.
21. Stepanov A., Mavrogenes J.A., Meffre S., Davidson P. The key role of mica during igneous concentration of tantalum // Contrib Mineral Petrol., 2014. - V. 167. - P. 1009.
22. 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. – V. 35. - P. 229-235.
23. Barth M.G., Mc Donough W.F., Rudnick R.L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust // Chem Geol., 2000. -V. 165. - P. 197-213.
24. 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, Институт земной коры СО РАН, 2016. – С.58-60.
25. Гусев А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М. Абсолютный возраст, петрология, геохимия и рудоносность Точильного штока Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета, ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ, 2017. -Т. 328. - № 3. – С. 14-26.
26. Jeong-Im O., Sung H. C., Keewook Y. Origin of adakite-like plutons in southern Korea // Lithos. – 2016. – V. 262. – P. 620–635.
27. 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, H. Gu, A.S. Mastoi, W. Sun // Lithos. – 2016. – V. 262. – P. 651–667.

KARAKOLSKAJA URANIM-RARE METALLIC MAGMA-ORE-METASOMATIC SYSTEM OF GORNY ALTAI

Gusev A.I.

The Shukshin Altai State Academy of Education, c. Biisk E- mail - anzerg@mail.ru

New data about geological structure and composition of magmatic, ore formation and near ore metasomatic changings of complex Karakolskoe deposit of Gorny Altai. The same name stock has zone structure and it composed by two micas granites, with predominance biotites, two micas leucogranites with predominant muscovite, muscovite leucogranites, fine grained two micas leucogranite-porphyrtes and dike of aplites and alaskites. Rocks of stock submit result of mixed different on composition of melting: calc-alkalic low- aluminum and high-aluminum adakitic with different degrees of partial melting of garnet amphibolites. The tetradic effect of fractionation REE M- type display in rocks. Concentration of beryllium in magmatic rocks rise with increasing of quantity of tetradic effect fractionation REE M-type that it condition transfer of metal by complex compounds of fluor in magmatic fluids. On the isotope of sulfur, carbon and oxygen in minerals

set mantle and crust sources of ore mineralization. Results in data allow to detach magmatic stock in independent Karakolskii granite-leucogranitic complex of Early Triassic age. Ore mineralization occurs by quartz-greisen type with beryl, molybdenite, chalcopyrite, pyrite, bismuthinite. Tantalum-niobium ore mineralization is disclosed at first. The late type ore mineralization is presented by lodes of carbonates with torbernite, metatorbernite and autunite.

Key words: granites, leucogranites, aplites, stock, dikes, tetradic effect fractionation of REE M-type, lodes, greisens, isotopes of sulfur, carbon, oxygen, beryllium, molybdenum, copper, bismuth, tantalum, niobium, uranium.