

УДК 550.4:551.3:553.3/4

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОХИМИИ МИНЕРАЛОВ КАЗАНДИНСКОГО БЕРИЛЛИЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев А.И., Гусев Н.И.

*Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина,  
Бийск, e-mail: anzerg@mail.ru*

Приведены геохимические данные по 20 пробам различных минералов бериллиевого Казандинского месторождения Горного Алтая: берилла, турмалина, молибденита, вольфрамит, флюорита, мусковита, петалита, кварца, пирита и других. Впервые определены для месторождения петалит и поллуцит и выявлена литиевая и цезиевая минерализация. Минералы проанализированы на 42 химических элемента. Отмечены повышенные концентрации золота и серебра в рудах с сульфидами. Установлена вертикальная зональность (на 300 м по вертикали) оруденения по концентрациям элементов-примесей в минералах: для верхних горизонтов в минералах характерны повышенные концентрации Li, Cs, а в нижних – Ag, Bi. Молибденит месторождения содержит повышенные концентрации рения.

**Ключевые слова:** берилл, турмалин, молибденит, вольфрамит, флюорит, мусковит, петалит, поллуцит, кварц, пирит, Au, Ag, Bi, Li, Cs, Re

## SOME SPECTS OF GEOCHEMISTRY MINERALS KAZANDINSKOE BERYLLIUM DEPOSIT OF MOUNTAIN ALTAI

Gusev A.I., Gusev N.I.

*The Shukshin Altai State Academy of Education, Biisk, e-mail: anzerg@mail.ru*

Geochemical data on 20 probes of different minerals of Kazandinskoe beryllium deposit of Mountain Altai: beryl, tourmaline, molybdenite, wolframite, fluorite, muscovite, petalite, quartz, pyrite and other. Petalite and pollucite define for deposit for the first time. Minerals analyzed on 42 chemical elements. High concentration of gold and silver in ores with sulfides noted. The vertical zoning (on 300 m on vertical) of ore mineralization on concentration element-admixture in minerals arrange: for the high horizons in minerals characteristic high concentration Li, Cs, but for the low horizons – Ag, Bi. Molybdenites of deposit content high concentration of renum.

**Keywords:** beryl, tourmaline, molybdenite, wolframite, fluorite, muscovite, petalite, quartz, pyrite, pollucite, Au, Ag, Bi, Li, Cs, Re

Изучение элементов-примесей в минералах руд и горных пород имеет большое теоретическое, прикладное и экономическое значение [2, 3, 4, 6]. Это особенно важно для месторождений, связанных с редкометалльно-обогащенными гранитоидными системами, к которым и относится рудогенерирующий массив бериллиевого Казандинского месторождения. *Целью исследования* является изучение концентраций элементов-примесей в минералах Казандинского бериллиевого месторождения на различных его срезах кинетическим методом, а также ICP-MS и ICP-AES.

### Результаты исследования и их обсуждение

*Казандинское бериллиевое месторождение* находится в верховьях ключа Феоктистова, правого притока р. Щебеты [3]. Бериллоносные кварцевые жилы впервые были выявлены в 1947 г. при поисково-разведочных работах на Казандинском вольфрамовом месторождении, а глыбы и обломки кварца с бериллом отмечались при разведке колумбитовой россыпи по ключу Феоктистовому. С 1951 по 1960 гг. на месторождении проводились поисковые и разведочные работы Алтайской экспедицией. Пройдено 2271 п.м.

штолен и штреков (4 штольни), 60 п.м. восстающих, пробурено 50 скважин глубиной до 200–300 м. С поверхности месторождение изучено густой сетью канав и шурфов. С 1960 по 1965 гг. в районе месторождения проводятся тематические исследования различными организациями. Проводится опробование вмещающих оруденение гранитов. В 1989–1990 гг. по договору с Едиганской партией работы по прогнозной оценке Казандинского бериллиевого и вольфрамового месторождения выполнялись сотрудниками СНИИГГиМСа (г. Новосибирск) под руководством А.А. Долгушиной. Проводились термолюминисцентный и термобарогеохимический анализы кварца разных генераций из кварцевых жил месторождения. В результате делается вывод о том, что месторождение может расцениваться лишь как мелкий объект. Месторождение расположено в эндоконтакте Щебетинского интрузивного массива, контактирующего с песчано-сланцевыми отложениями суеткинской свиты на востоке и Казандинским интрузивным массивом на юго-востоке. Контакт Щебетинских мусковитовых гранитов с осадочными образованиями падает в сторону последних под углом 30–65°. Отложения суеткинской свиты ороговикованы на расстоянии 2–3 км от массива.

Оруденение приурочено к кварцевым жилам, выполняющим трещины отрыва, возникшие в связи с установленной здесь тектонической зоной северо-восточного простирания. Горными выработками предшествующих исследователей вскрыта 91 кварцевая жила. Жилы имеют кулисообразное строение, причем сравнительно часто встречаются «слепые жилы». Простирание жил от 250 до 300°, падение на юго-запад и юго-восток под углами 65–85°, протяженность от десятков до нескольких сотен метров, мощность от 0,15 м до 1,2 м (средняя 0,39 м). Основным полезным компонентом является берилл, который отмечается двух типов – мелкокристаллический и крупнокристаллический. Крупнокристаллический берилл наблюдается в виде кристаллов хорошей огранки размером до 10x2 см или в виде гнезд размером до 10x10 см. Другими жильными минералами являются молибденит, турмалин, пирит, висмутин, мусковит, флюорит, вольфрамит, петалит, сфалерит, галенит. Молибденит, в основном, приурочен к мусковитовой оторочке кварцевых жил, местами образуя довольно густую вкрапленность. Нами в составе мусковитовых оторочках кварцевых жил и в грейзенах, помимо молибденита, установлена вкрапленность и гнезда литиевого минерала – петалита и цезиевого – поллуцита. В этой же ассоциации отмечены редкие выделения лепидолита, турмалина. Пирит встречается довольно редко, образуя одиночные кристаллы кубической формы и друзы размером до 5x5 см. В кварцевых жилах встречаются пустоты с кристаллами (размером до 4x10 см) и друзами мориона и дымчатого кварца. Кроме кварцевых жил убогое бериллиево оруденение выявлено в эндоконтактных зонах мелкозернистых мусковитовых гранитов. Мощность изучавшихся зон с неравномерно-вкрапленной берилловой минерализацией составляет 2–3 м, содержание BeO до 0,126%. Среднее содержание по одной из зон, вскрытых штольной 2 (на участке 70,5–72,5 м) составляет 0,03% BeO. В связи с низкими содержаниями запасы бериллия в бериллоносных гранитах не подсчитывались. По данным спектрального анализа точечных проб, отобранных из рудных отвалов штолен, получены повышенные содержания следующих элементов: медь – до 0,05%, свинец – до 0,1%, молибден – до 0,3%, висмут – до 0,05%, кадмий – до 0,003%. Кроме того, в пробе кварца с пиритом (около 50%) по спектральному анализу выявлено содержание серебра 500 г/т. В этой же пробе пробирным анализом установлено 134 г/т серебра и 0,5 г/т золота. В рядовых пробах со-

держании золота 0,2 г/т, содержание серебра до 9 г/т. Генезис месторождения гидротермальный плутоногенный, рудная формация – редкометальная с серебром. Запасы оксида бериллия по категории В + С<sub>1</sub> + С<sub>2</sub> по результатам разведки составляют 1218,806 тонн при среднем его содержании 0,194% (по материалам работ 1951–1960 гг.). Прогнозные ресурсы оксида бериллия категории Р<sub>1</sub>, определенные при ГС-50 (Кузнецов, 1990) до глубины 300 м, составляют 1828 т. Суммарные запасы и ресурсы Казандинского бериллиевого месторождения составляют 3047 т. В сводном балансе запасов по месторождению по состоянию на 01.01.2002 г числятся запасы оксида бериллия категории В – 42 т, категории С<sub>1</sub> – 449 т, категории С<sub>2</sub> – 491 т при среднем содержании BeO 0,198%.

По данным термобарогеохимического анализа содержание основных компонентов флюида ГЖВ кварца для бериллиевого Казандинского месторождения близки таковым Казандинского вольфрамового (табл. 1). Но имеются и отличия [1].

Для бериллиевого Казандинского месторождения характерно более высокое содержание воды во флюидах и меньшее – углекислоты. Соответственно, у него меньше отношение CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O×100, что свидетельствует о более открытой системе при становлении бериллиевого оруденения или его более глубоком эрозионном срезе, чем вольфрамового месторождения.

Нами изучено содержание элементов-примесей в 20 минералах бериллиевого Казандинского месторождения, представленных в табл. 2 и 3. Суммарные концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) в минералах месторождения варьируют от 2,63 (в пирите) до 1293,8 (в кварце). Отношения (La/Yb)<sub>N</sub> варьируют от 0,13 (в кварце) до 14,1 (в пирите). Таким образом, выявляется обратная зависимость суммы РЗЭ и степени дифференциации РЗЭ.

Обращают на себя внимание высокие концентрации лития и цезия в монофракциях берилла, молибденита. Вероятно, повышенные концентрации этих элементов не случайны. В грейзенах и мусковитовых оторочках кварцевых жил впервые нами установлены собственные минералы цезия и лития. По геохимическим пробам в таких участках содержания оксида лития варьируют от 0,1 до 0,6%, а оксида цезия – от 0,01 до 0,1%. Примечательно, что концентрации лития и цезия в бериллах верхних горизонтов месторождения выше, чем в нижних (табл. 2).

Таблица 1

Состав газовой-жидких включений в кварце рудных жил  
Казандинского бериллиевого месторождения (мг/кг)

Компоненты	1	2	3	4	5
CO <sub>2</sub>	184	147	179	129	159
H <sub>2</sub> O	1471	1614	1797	1705	1650
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,8	0,5	1,4	0,3	0,8
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,3	0,2	0,6	0,3	0,5
N <sub>2</sub>	8,5	7,3	7,2	7,1	7,7
CH <sub>4</sub>	0,6	0,4	1,3	0,3	0,8
H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub>	1655	1761	1976	1834	1806
CO	3,1	2,4	4,3	2,7	3,1
$\frac{CO_2 \times 100}{H_2O}$	12,5	9,1	10,0	7,6	9,8
K <sub>в</sub> × 1000	2,8	2,0	3,8	1,8	2,6
Σгазов	198	158	194	139	173
Σ+H <sub>2</sub> O	1668	1772	1991	1844	1819

Примечание: 1-5 – номера проб; K<sub>в</sub> × 1000 – коэффициент восстановленности флюидов;  
с – следы.

Таблица 2

Элементы-примеси в бериллах, молибдените и флюоритах  
Казандинского бериллиевого месторождения (г/т)

Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V	14,7	15,1	10,8	8,65	21,0	7,75	3,85	7,65	8,44
Cr	7,15	7,5	7,24	6,08	5,5	10,1	5,3	6,0	6,07
Co	1,33	1,4	0,5	0,5	1,8	0,5	0,5	0,5	0,5
Ni	2,89	3,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
Cu	7,5	8,8	3,73	4,19	5,9	2,26	3,42	3,7	3,88
Zn	49,3	50,2	36,1	49,7	43,1	20,3	77,2	40,8	41,8
Rb	33,2	35,3	31,8	25,8	75,3	3,85	2,0	25,7	26,2
Sr	8,25	9,28	4,37	3,7	5,1	20,0	8,24	3,1	3,25
Nb	3,27	4,1	1,83	1,91	17,3	1,69	5,86	1,1	1,19
Cs	561	580	691	566	550	0,44	6,17	420	450
Ba	35,2	36,1	30,1	28,3	67	37,3	19,1	24,9	25,6
Pb	11,4	12,1	4,44	8,7	21,3	4,95	20,7	8,1	8,81
Th	0,89	0,95	0,44	0,42	0,8	4,82	9,9	0,35	0,39
La	2,07	2,95	0,99	0,92	0,75	7,32	29,3	0,83	0,84
Ce	3,2	3,5	1,91	1,83	3,75	12,7	57,2	1,41	1,49
Pr	0,39	0,42	0,2	0,18	2,37	1,09	5,6	0,13	0,15
Nd	1,21	1,3	0,63	0,75	3,76	2,92	16,1	0,55	0,59
Sm	0,22	0,28	0,18	0,13	0,76	1,28	3,41	0,08	0,096
Eu	0,044	0,05	0,034	0,036	0,13	0,083	0,12	0,0091	0,0093
Gd	0,14	0,17	0,094	0,088	0,53	1,93	2,85	0,06	0,07
Tb	0,019	0,02	0,021	0,0097	0,175	0,5	0,49	0,021	0,022
Dy	0,19	0,22	0,073	0,04	0,5	4,23	3,24	0,033	0,035
Ho	0,04	0,05	0,011	0,0097	0,158	1,06	0,65	0,01	0,012
Er	0,12	0,15	0,052	0,026	0,21	3,38	2,26	0,015	0,019
Tm	0,024	0,03	0,015	0,011	0,11	0,74	0,48	0,005	0,0052
Yb	0,15	0,16	0,099	0,041	0,18	4,69	3,38	0,055	0,061
Lu	0,031	0,04	0,013	0,0086	0,12	0,73	0,53	0,0093	0,0096
Y	1,38	1,45	0,66	0,44	15,2	140	60,8	0,45	0,48
Ga	19,3	20,1	18,8	17,5	16,9	0,96	0,99	14,8	15,6

Окончание табл. 2									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zr	6,62	8,12	4,45	4,13	5,9	5,01	6,2	2,9	3,24
Sc	1,86	1,75	1,48	2,73	3,4	0,2	0,2	1,18	1,22
Hf	0,26	0,25	0,28	0,09	0,3	0,24	0,53	0,1	0,1
Ta	0,76	0,8	0,25	0,22	0,94	0,66	1,07	0,1	0,1
Mo	4,62	4,5	3,36	5,07	-	6,34	20,3	2,2	2,39
Sb	0,51	0,55	0,45	0,29	0,8	0,26	0,74	0,25	0,26
Sn	0,97	1,0	0,87	0,56	1,8	0,56	0,63	0,85	0,86
Be	24800	24700	30600	31200	25,8	5,37	330	28900	29000
W	15,8	16,1	7,74	5,87	25,1	16,9	39	5,1	5,17
U	0,95	1,01	0,73	0,46	0,87	1,14	3,19	0,15	0,16
Li	645	650	584	711	448	4,4	20,4	225	233
Ge	0,23	0,25	0,15	0,19	1,8	0,1	0,21	0,1	0,1
Ag	0,044	0,045	0,042	0,022	0,76	0,015	0,05	0,15	0,12
Bi	3,85	3,77	7,28	5,57	19,6	0,49	0,54	8,5	7,06
ΣTR	9,228	10,79	4,982	4,52	28,7	265,57	187,4	3,66	3,89
(La/Yb) <sub>N</sub>	9,12	12,15	10,13	9,21	2,75	6,68	14,6	1,03	5,72

Примечание: Анализы выполнены методами ICP-MS и ICP-AES в Лабораториях ВСЕ-ГЕИ (г. Санкт-Петербург) и ИМГРЭ (г. Москва). Верхние горизонты месторождения: 1–4 – берилл, 5 – молибденит, 6–7 – флюорит; нижние горизонты: 8, 9 – берилл.

Примечательно, что наиболее высокие концентрации цезия и лития зафиксированы в мусковитах и турмалине грейзенов (табл. 3). Последний в грейзенах нередко образует полихромные кристаллы размерами от 1 до 3 см. Вероятно, примеси цезия и лития и являются хромофорами в полихромном турмалине. Му-

сковит грейзенов характеризуется высокими концентрациями Rb, Nb, Cs, Ta, превышающими фермы этих элементов в минерале [5].

Кинетическим анализом (Лаборатория ИМГРЭ, Москва) в монофракциях молибденита определены повышенные концентрации рения, варьирующие от 50 до 75 г/т.

Таблица 3

Элементы-примеси в пиритах, вольфрамитах, мусковитах, турмалине, петалите и кварце Казандинского бериллиевого месторождения (г/т)

Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V	4,31	6,82	7,4	7,8	6,01	2,5	16,3	3,83	3,75	3,3	3,49
Cr	4,6	5,51	10,1	10,5	5,18	1,4	4,48	6,3	5,2	4,36	4,33
Co	15,2	0,5	0,59	0,6	0,65	1,3	1,65	0,5	0,5	71,9	14,3
Ni	2,28	1,0	1,0	1,1	1,0	1,5	1,0	1,0	1,7	1,0	3,36
Cu	17,4	3,33	4,09	4,2	24,9	13,8	14,5	35,1	25,1	2,57	2,88
Zn	1020	62,4	26,3	25,8	247	242	289	7,6	18,6	2,05	4,61
Rb	3,98	14,1	40,8	38,9	534	1620	1520	2,3	35,5	2,0	9,65
Sr	3,08	9,38	12,0	11,5	19,1	24	2,39	503	12,8	2,07	2,5
Nb	0,5	2,07	181	190	53,1	235	229	5,1	1,8	0,5	1,12
Cs	0,68	249	4,87	5,2	622,6	1711	159	0,18	12,2	0,56	0,86
Ba	29,9	25,5	44,8	40,7	33,8	30	27,9	22,1	24,6	24,8	25,9
Pb	75	8,21	413	405	49,0	12,4	14,2	16,1	22,5	62,9	9,81
Th	0,32	0,28	1,0	1,1	2,41	8,1	7,68	44,1	0,16	0,21	0,33
La	0,83	0,74	7,31	7,45	2,63	0,91	0,83	28,1	0,37	0,49	1,56
Ce	1,7	1,29	18,7	19,1	6,69	3,01	2,16	103,1	0,79	0,96	2,97
Pr	0,18	0,13	2,22	3,1	0,88	0,4	0,31	21,5	0,099	0,092	0,39
Nb	0,83	0,47	9,08	10,2	3,13	1,3	1,27	116,1	0,32	0,51	1,33
Sm	0,12	0,16	2,77	3,0	1,04	0,51	0,45	90,0	0,14	0,097	0,36
Eu	0,028	0,024	0,15	0,11	0,045	0,017	0,016	5,9	0,018	0,017	0,014

Окончание табл. 3											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Gd	0,065	0,14	2,98	3,02	0,89	0,38	0,36	85,0	0,057	0,063	0,22
Tb	0,014	0,044	0,64	0,8	0,19	0,07	0,065	27,7	0,014	0,005	0,027
Dy	0,075	0,21	4,79	5,1	1,75	0,51	0,48	201,1	0,089	0,021	0,14
Ho	0,014	0,048	0,77	0,82	0,36	0,13	0,11	32,0	0,027	0,0053	0,028
Er	0,023	0,15	2,28	2,3	1,06	0,4	0,41	95,1	0,033	0,011	0,052
Tm	0,015	0,04	0,48	0,5	0,26	0,5	0,48	23,2	0,0098	0,008	0,12
Yb	0,051	0,37	2,44	2,5	2,09	2,1	1,13	141	0,06	0,023	0,12
Lu	0,0053	0,049	0,33	0,35	0,38	0,2	0,18	23	0,14	0,0056	0,0069
Y	0,45	1,16	33,2	35,1	11,9	5,1	4,28	301	0,55	0,28	0,94
Ga	0,86	8,77	3,73	3,8	30,0	105,2	96,7	1,8	9,5	0,58	12,0
Zr	1,9	2,28	6,95	7,0	17,8	25,1	22,1	7,8	2,1	1,53	2,72
Sc	0,2	1,04	101,5	103,6	8,29	15,3	12,5	1,4	0,35	0,23	0,2
Hf	0,046	0,13	0,38	0,4	1,24	2,1	1,56	3,3	0,065	0,023	0,15
Ta	0,1	0,15	88,2	91,3	6,92	65,8	59,9	1,3	0,35	0,1	0,1
Mo	2,57	59	2,86	3,1	44,4	45,1	42,7	88	22,5	9,09	1,57
Sb	0,94	0,1	0,49	0,5	1,61	0,3	0,27	1,2	3,2	12,1	0,17
Sn	0,2	1,74	2,36	2,4	4,77	14,1	13,5	2,5	1,9	0,45	0,51
Be	15,9	183,0	24,0	21,3	7,23	18,5	17,2	1,3	3,3	53,9	8,34
W	1,23	-	-	-	12,1	95,3	91,7	501	60,3	0,82	1,07
U	0,12	6,82	11,7	12,1	28,8	4,05	3,06	0,9	0,13	1,11	0,11
Li	2,84	410	56,3	58,2	748	877	794	113	25500	3,63	10,4
Ge	0,1	0,8	1,24	1,3	2,3	4,5	3,45	2,1	6,5	0,1	0,11
Ag	14,4	0,024	0,067	0,07	0,22	0,16	0,15	0,3	0,2	3,87	3,46
Bi	118	0,74	1,54	1,7	2,83	10,3	9,25	25,0	5,5	460	434
ΣTR	4,4	5,03	88,14	93,45	33,29	15,54	12,53	1293,8	2,73	2,63	8,28
(La/Yb) <sub>N</sub>	10,52	1,32	1,98	1,96	0,83	0,28	0,48	0,13	4,03	14,1	8,53

Примечание: Анализы выполнены методами ICP-MS и ICP-AES в Лабораториях ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) и ИМГРЭ (г. Москва). Верхние горизонты месторождения: 1 – пирит, 2–4 – вольфрамит, 5 – турмалин, 6, 7 – мусковит, 8 – кварц, 9 – петалит; нижние горизонты: 10, 11 – пирит.

### Выводы

Полученные данные указывают на то, что многие минералы Казандинского месторождения характеризуются повышенными концентрациями избирательного спектра элементов. Особенно показательны концентрации лития и цезия во многих минералах, указывающих на геохимическую специализацию и минералов, и руд этого месторождения, которое не изучено на указанные элементы. Нами установлены и минеральные формы повышенных концентраций цезия и лития (поллуцит и петалит). По геохимическим пробам грейзенов с петалитом и поллуцитом выявлены промышленные концентрации цезия и лития. Это значительно увеличивает перспективы Казандинского месторождения, как комплексного объекта, который ранее считался чисто бериллиевым. Распределение элемен-

тов-примесей в минералах указывает на вертикальную зональность оруденения: на верхних горизонтах преобладают в минералах Li, Cs, а на нижних горизонтах (300 м по вертикали) – преобладают Ag, Bi.

### Список литературы

1. Гусев А.И. Петрология и рудоносность анорогенных щелочных гранитоидов Казандинского массива Горного Алтая // Современные наукоёмкие технологии, 2013. – № 1. – С. 88–93.
2. Гусев А.И. К геохимии флюорита Горного Алтая // Успехи современного естествознания, 2013. – № 11. – С. 103–108.
3. Гусев А.И. Типы бериллиевого оруденения Алтая // Успехи современного естествознания, 2013. – № 2. – С. 31–35.
4. Гусев А.И. К геохимии сульфидных минералов месторождений Солонешенского рудного района Горного Алтая // Современные наукоёмкие технологии, 2013. – № 12. – С. 106–111.
5. Иванов В.В., Белевитин В.В., Борисенко Л.Ф. и др. Средние содержания элементов-примесей в минералах. – М.: Недра, 1973. – 208 с.
6. Kempe U., Wolf D. Anomalously high Sc contents in ore minerals from Sn-W deposits^ Possible economic significance and genetic implications // Ore geology Reviews, 2006. – V. 28. – P. 103–122.