

Геология, минералогия, тектоника рудных полей и месторождений

УДК 553.493.45

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ФТОР-БЕРИЛЛИЕВЫХ РУД АУНИКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

М.О. Рампилов¹, Г.С. Рипп², В.Ф. Посохов³

Геологический институт СО РАН, 670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба.

Целью работы является изотопно-геохимическое изучение Ауникского фтор-бериллиевого месторождения. Получены данные по изотопному составу кислорода и углерода во вмещающих мраморизованных известняках, рудных и пострудных парагенезисах, кислорода в оксидах и силикатных минералах, а также серы в сульфидах. Проведенные изотопно-геохимические исследования показали заметную гетерогенность изотопного состава кислорода в минералах, связанных с бериллиевым оруденением, и их относительную обогащенность тяжелым кислородом. Последнее свидетельствует о контаминации вмещающих известняков. В составе флюидной фазы просматривается участие вод ювенильного и метеорного источников. Повышенные концентрации редких элементов в рудах свидетельствуют об их привносе из магматических пород повышенной щелочности.

Ключевые слова: изотопный состав; фтор-бериллиевые месторождения; бериллиевые минералы.

ISOTOPIC-GEOCHEMICAL FEATURES AND ORIGIN OF FLUORO-BERYLLIUM ORES AT THE AUNIK DEPOSIT (WESTERN TRANSBAIKALIA)

M.O. Rampilov, G.S. Ripp, V.F. Posokhov

Geological Institute SB RAS, 6a Sakhyanova St., Ulan-Ude, Buryat Republic, 670047, Russia.

The article presents the results of isotopic and geochemical researches of the Aunik fluoro-beryllium deposit. The first data are obtained on isotopic composition of oxygen and carbon in country marbleized limestones, ore and post-ore assemblages, oxygen in oxides and silicate minerals as well as on sulfur in sulfides. Conducted isotopic and geochemical studies indicate a significant heterogeneity of isotopic composition of oxygen in the minerals associated with beryllium mineralization, and their relative enrichment with heavy oxygen. The latter is indicative of the contamination of enclosing limestones. The participation of primitive and meteoric water sources is detected in the fluid phase. Elevated concentrations of trace elements in ores testify that they were supplied by igneous rocks of elevated alkalinity.

Keywords: isotopic composition; F-Be deposits; Be-minerals.

Введение. На территории Западного Забайкалья установлена крупная бериллиеносная провинция, протягивающаяся от Витимского плоскогорья до

бассейна р. Джиды. Среди проявлений бериллия наиболее изученным является одно из крупнейших в мире Ермаковское флюорит-фенакит-бертрандитовое

¹Рампилов Михаил Олегович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории петрологии, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: mrampilov@mail.ru

Rampilov Mikhail, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Researcher of the Petrology Laboratory, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: mrampilov@mail.ru

²Рипп Герман Самуилович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: ripp@gin.bscnet.ru

Ripp German, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Leading Researcher of the Petrology Laboratory, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: ripp@gin.bscnet.ru

³Посохов Виктор Федорович, старший научный сотрудник лаборатории физических методов анализа, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: vitaf1@yandex.ru

Posokhov Viktor, Senior Researcher of the Laboratory of Physical Methods of Analysis, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: vitaf1@yandex.ru

месторождение, менее изучено Ауникское фтор-бериллиевое месторождение. Последнее расположено на Витимском плоскогорье, в междуречье рек Чина и Малый Амалат. По балансовым запасам месторождение относится к крупным объектам с бедными рудами.

При имеющейся информации по геологии и минералогии [4], геохронологическому изучению [1, 2] осталась не изученной проблема источников рудного вещества. Так как руды и метасоматиты месторождения представляют собой многокомпонентную систему, перед нами стояла задача определить источники кислорода, серы, углекислоты и флюидов. Одним из способов решения таких задач в настоящее время являются изотопные исследования. В связи с этим нами изучены вмещающие породы, метасоматиты, рудные и пострудные минеральные ассоциации.

Методы исследования. Изотопные составы кислорода и углерода проанализированы в Геологическом институте СО РАН. Кислород в силикатах определен методом лазерного фторирования, а углерод и кислород в карбонатах – по методике разложения ортофосфорной кислотой с использованием опции «Газбенч» при температуре 60–70°C в течение 2–4 часов. Все измерения проведены на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 в режиме двойной системы напуска для кислорода в силикатах и методом continuous flow (в постоянном потоке гелия) для карбонатов. Калибровка для силикатов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит), а для карбонатов и по NBS-18, NBS-19. Погрешность полученных значений составила не более 0,2–0,3%.

Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН. Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы проведена по методике, описанной в статье [3]. Сера сульфидов окислялась до SO₂ с использованием оксида меди. Реакция окисле-

ния проводилась в вакууме при температуре 900°C. Полученный SO₂ очищался от остальных продуктов реакции на терморегулируемой криогенной ловушке. Очищенный SO₂ вымораживался в отдельную ампулу. Измерение изотопных соотношений серы проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска. Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ (1 σ) составляет 0,1%.

Составы минералов определены на модернизированном рентгеновском микроанализаторе MAP-3 (аналитик С.В. Канакин). Съемки проводились при 15–20 kV, ускоряющем напряжении токе зонда от 20 до 40 нА, времени измерения 20 с и диаметре зонда 2–3 мкм. С целью получения более достоверных результатов, как правило, анализ проводился в нескольких точках. Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy.

Краткая геологическая характеристика месторождения. Месторождение приурочено к ядру осложненной дизъюнктивными нарушениями антиклинальной складки, сложенному тонкослоистыми углистыми известняками, переслаивающимися с углистокарбонатными сланцами. На крыльях складки отмечаются прослой углистых известняков при доминирующем развитии углисто-глинисто-карбонатных и филлитовидных хлорит-серицитовых сланцев. Осадочно-метаморфические породы пересечены многочисленными дизъюнктивными нарушениями. Большая часть разрывных нарушений имеет СЗ простирание и субсогласна с простиранием пород (рис. 1).

Наиболее ранними магматическими породами на месторождении являются керсантиты, образующие небольшой шток в восточной его части. Это порфиroidные массивные породы с

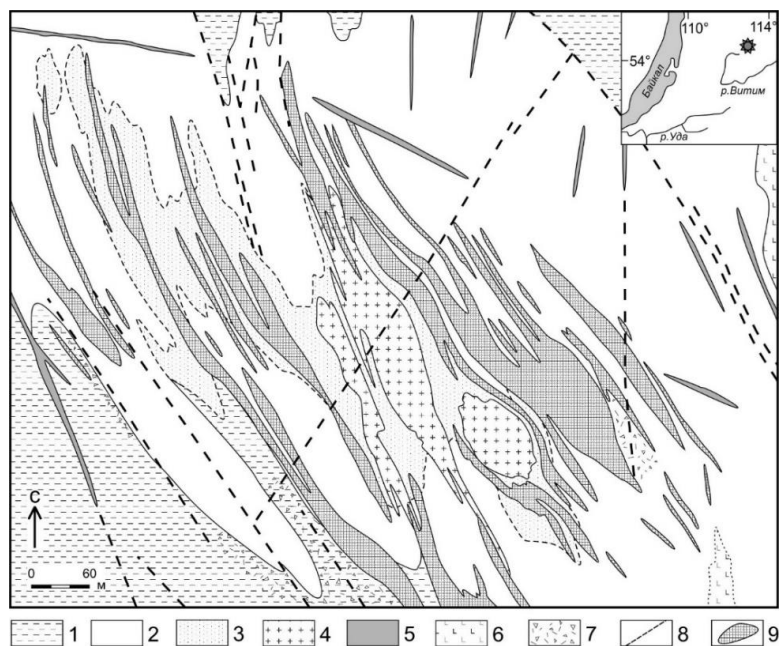


Рис. 1. Схема геологического строения Ауникского фтор-бериллиевого месторождения (по данным Е.И. Галанина):

1 – сланцы с прослоями известняков; 2 – известняки, доломиты; 3 – скарны и скарнированные известняки; 4 – субщелочные граниты, кварцевые сиениты; 5 – дайки сиенитов; 6 – керсантиты; 7 – зоны дробления и брекчирования; 8 – разрывные нарушения; 9 – рудные тела

мелкозернистой основной массой, состоящей из биотита и плагиоклаза.

Субщелочные граниты образуют два интрузивных тела, вытянутых в северо-западном направлении. Это порфировидные породы с гипидиоморфно-зернистой структурой, сложенные калиевым полевым шпатом, кварцем и альбитом. Интрузии частично альбитизированы и окварцованы. В апикальных частях массивов и апофизах они превращены в альбититы и кварц-альбитовые породы с тонкочешуйчатым мусковитом. Участками в них встречаются кварцевые прожилки с молибденитом, галенитом, сфалеритом, арсенипиритом. Возраст пород (Rb-Sr) составил 241 млн лет [2].

В экзоконтакте гранитов вмещающие породы окварцованы, превращены в диопсид-везувиановые скарны с тремолитом, актинолитом и волластонитом. К молодым интрузивным породам относятся дайки сиенитового и базитового составов.

На месторождении установлены три субпараллельные линейно-вытянутые минерализованные зоны. В

пределах этих зон присутствуют около 35 рудных тел. Наиболее богатые участки их расположены в известняках, в меньшей мере – известково-углистых сланцах. Рудные тела расположены как в непосредственной близости от гранитов, так и на удалении от них, где тяготеют к дайкам сиенитов. По простиранию они протягиваются на 150–300 м, их мощность колеблется от 3 до 60 м, на глубину они прослежены до 350 м. Возраст руд (Rb-Sr) составил 243–257 млн лет, а температура образования варьировала от 360 до 90°C [1].

Минеральный состав. Жилы и линзообразные тела руд, залегающих среди известняков, имеют массивную и полосчатую текстуры, мощностью от 0,5 до 2,5 м. Сложены они в основном флюоритом с переменными количествами карбонатов, калиевого полевого шпата, альбита, кварца, фенакита, бертрандита и пирита. В алюмосиликатных породах рудные тела представлены маломощными (до 5–7 см) флюорит-полевошпатовыми прожилками. В зальбандах они обычно состоят из флюорита, осевая часть сложена калишпатом,

кварцем и кальцитом. По периферии прожилков располагаются альбит и берtrandит с реликтами калишпата. В составе руд также установлены циркон, апатит, бастнезит, монацит, ферриторит, рутил, молибденит, пирит, сфалерит, галенит, арсенопирит. Содержание ВеО в рудах невысокое (в среднем 0,18%). Основная масса оксида бериллия связана с берtrandитом, меньше с фенакитом.

Кроме высоких содержаний флюорита важной особенностью Ауникского месторождения является распространенность карбонатных минералов, калиевого полевого шпата и сульфидов. Среди сульфидов выделяется две группы. Одну из них представляют углеродизированные сланцево-карбонатные породы; сульфиды в них представлены пиритом. К другой группе относятся сульфидизированные магматические породы, скарны и фтор-бериллиевые руды с пиритом, пирротином, арсенопиритом и молибденитом, галенитом, сфалеритом.

Среди карбонатных минералов также выделяется две группы. Первая, ассоциирующая с фтор-бериллиевыми рудами, представлена в основном железистым доломитом. К другой относятся более поздние карбонатные и кварц-карбонатные прожилки, встречающиеся как среди рудных тел, так и во вмещающих породах. Часть из них образовалась на завершающем этапе формирования руд, скарнов и, возможно, является продуктом перекристаллизации известняков. Состав карбонатных минералов различных образований достаточно резко отличается, что хорошо видно на рис. 2. Определить природу некоторых карбонатных прожилков не всегда возможно. В качестве признака их связи с рудами выступает присутствие в них включений флюорита и калиевого полевого шпата.

Геохимическая характеристика. Интрузивные породы на Ауникском месторождении относятся к субщелочной

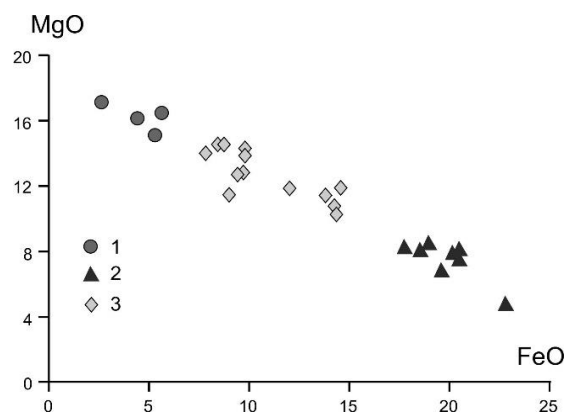


Рис. 2. Сравнительная диаграмма состава доломитов, %:

1 – из вмещающих мраморизованных известняков; 2 – из фтор-бериллиевых руд; 3 – из карбонатных прожилков

серии. По содержанию суммы щелочей в гранитах (более 9 мас. %), коэффициенту алкаитности (<1) они попадают в поле высококальциевой высокощелочной серии. По работе [2] микроэлементный состав гранитов и сиенитов в целом близок, однако в гранитах несколько понижены содержания гафния и циркония и повышены – тория, урана и редкоземельных элементов. Химический состав известняков, скарнов и руд представлен в табл. 1, из которой отчетливо видна обогащенность фтор-бериллиевых руд глиноземом, калием и углекислотой, связанная с присутствием в них калиевого полевого шпата и карбонатов.

Содержание примесных элементов отражено на рис. 3 и приведено в табл. 2. Все породы характеризуются присутствием бериллия, в богатых рудах содержание его достигает 7000 г/т. Конфигурации спектров распределения нормированных к хондриту скарнов и руд в целом близки. В них отчетливо фиксируются положительные пики по торию, что объясняется присутствием ферриторита, и по калию, что предполагает принадлежность пород к высококальциевой серии.

В рудах, состоящих преимущественно из флюорита с примесью калиевого полевого шпата, альбита, кварца, отмечаются повышенные содержания рубидия, обусловленного присутствием

Таблица 1

Химический состав пород Ауникского месторождения, мас. %

Элемент	Мрамор		Скарн		Руда			
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	9,7	7,9	40	45,1	65,5	29,6	74,2	44,1
TiO ₂	0,13	0,02	0,56	0,45	0,15	0,08	0,11	0,42
Al ₂ O ₃	1,4	1,3	11,4	8,3	3,4	4,9	7,1	5,4
Fe ₂ O ₃	0,1	0,1	1,02	0,33	0,25	0,1	0,85	0,1
FeO	0,72	1	4,4	4	0,4	0,2	0,12	2,22
MnO	0,01	0,02	0,03	0,09	0,01	0,08	0,02	0,01
MgO	3,2	0,66	2,54	1,83	0,36	0,1	0,11	2
CaO	45,2	48,93	28,58	31,44	18,16	42,92	4,85	26
Na ₂ O	0,08	0,6	2,01	1,92	0,51	0,11	0,14	1,52
K ₂ O	0,31	0,02	1,07	0,73	0,87	2,95	5,48	1,81
P ₂ O ₅	0,03	0,03	0,52	0,13	0,05	2,74	0,09	0,63
П.п.п	39,46	39,27	6,47	4,56	3,92	3,48	2,69	9,05
Сумма	100,21	99,72	98,6	98,88	93,57	87,06	95,76	93,15
CO ₂	38,9	0,62	0,62	3,48	1,06	1,28	0,4	4,12
S	<0,2	<0,2	0,18	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
F	0,15	19	2,51	2,52	8,74	16,23	2,66	9,54
Fe ₂ O ₃	0,84	2,06	5,9	4,77	0,69	0,25	0,98	2,35

калиевого полевого шпата, а также редкоземельных элементов и иттрия. Ферриторит определил высокое содержание тория. Такие концентрации редких элементов свидетельствуют о привносе компонентов из магматических пород повышенной щелочности, так как ториевая природа характерна для щелочных комплексов.

Результаты изотопных исследований. Изотопному исследованию подверглись вмещающие породы и руды. Они включали определение составов кислорода и углерода в карбонатах, се-

ры в сульфидах, кислорода в силикатах и оксидах.

Результаты изотопного анализа кислорода и углерода в минералах приведены в табл. 3 и отражены на рис. 4. Проанализированные карбонатные минералы включают доломит из рудного парагенезиса, кальцит из поздних прожилков и вмещающие мраморизованные известняки. Все они обогащены тяжелыми кислородом и углеродом и находятся за пределами мантийных значений.

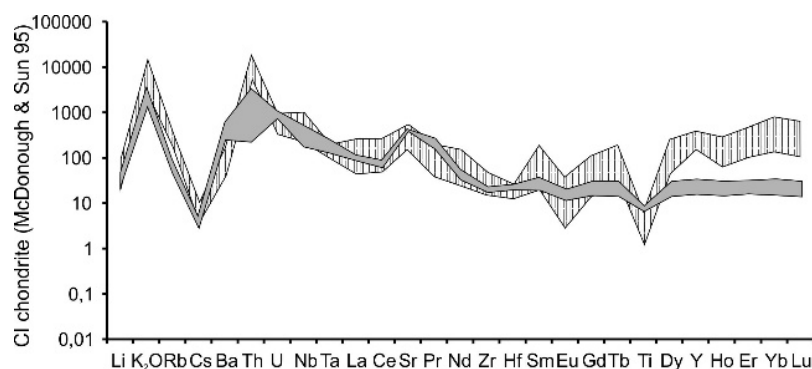


Рис. 3. Спайдер-диаграммы редких элементов, нормированных к хондриту для пород Ауникского месторождения. Вертикальной штриховкой показаны фтор-бериллиевые руды, серым полем – скарны

Таблица 2

**Содержание примесных элементов в породах и рудах
Ауникского месторождения, г/т**

Элемент	Скарн		Фтор-бериллиевая руда			Карбонатный прожилок
	1	2	3	4	5	
Li	66,88	34,1	12,11	30,09	149,14	61,65
Be	180,13	22,62	17,65	2049,58	5989,03	7269,4
Sc	15,74	13,16	13,76	6,17	1,39	1,22
Ti	3843,39	3048,91	31,12	2730,6	1111,69	560,64
V	254,31	223,19	3,92	105,27	28,5	28,74
Cr	109,07	85,12	0,3	41,08	7,76	7,63
Mn	951,89	982,06	907,45	1226,24	282,74	104,15
Co	19,54	14,72	2,73	4,65	3,16	3,54
Ni	59,94	55,21	14,21	15,32	9,05	13,56
Cu	19,93	8,58	3,92	5,41	14,89	5,68
Zn	297,25	229,55	5,11	224,69	14,69	58,21
Ga	17,03	12,61	1,03	9,83	3,26	5,98
As	45,67	14,13	8,59	7,63	29,44	10,4
Rb	215	107,13	7,5	473,08	243,38	768,95
Sr	2139,11	2947,58	5999,16	1992,11	1132,94	4075,96
Y	55,9	25,56	106,7	429,93	244,52	577,34
Zr	92,7	70,19	2,16	156,86	61,22	124,55
Nb	32,24	42,28	1,56	249,16	72,17	59,06
Mo	172,88	5,29	0,22	1,84	6,28	1,92
Sn	29,89	9,74	0,45	37,6	23,4	5,12
Ba	586,7	1499,66	56,94	396,73	99,65	293,86
La	27,85	20,42	7,01	61,16	10,53	52,28
Ce	56,8	39,18	17,94	144,26	31,57	168,94
Pr	6,52	4,3	2,57	13,54	3,66	21,38
Nd	25,23	15,11	12,9	36,72	11,21	72,79
Sm	5,47	2,92	4,59	13,23	3,07	28,57
Eu	1,19	0,66	3,04	0,84	0,16	1,58
Gd	6,2	2,98	8,4	13,04	2,69	22,06
Tb	1,12	0,51	1,74	4,94	1,01	7,21
Dy	7,76	3,54	13,51	44,28	10,99	61,65
Ho	1,69	0,83	3,24	10,97	3,43	15,65
Er	5,32	2,59	9,91	45,45	16,46	72,96
Tm	0,83	0,39	1,41	8,97	3,33	17,64
Yb	5,55	2,44	8,06	66,92	22,13	130,96
Lu	0,76	0,35	0,89	8,89	2,61	15,36
Hf	2,81	2,14	0,15	1,45	1,29	2,35
Ta	3,68	1,78	0,91	0,48	1,38	2,78
W	6,81	15,84	0,53	9,52	4,58	4,77
Pb	130,57	25,58	6,48	13,05	20,38	14,39
Th	101,14	6,75	4,77	168,53	537,91	165,12
U	8,05	5,55	0,18	1,87	7,14	2,53

Таблица 3

Изотопные составы кислорода и углерода

Номер минерала	Анализируемый материал	Минерал	$\delta^{13}\text{C} \%$ PDB	$\delta^{18}\text{O} \%$ SMOW	$\delta^{18}\text{O} \%$ fluid SMOW
1	Вмещающие мраморизованные известняки	кальцит	0	16,6	
2		кальцит	1,6	11,3	
3		кальцит	-1,7	9,2	
$T = 450^\circ\text{C}$					
4	Скарны пироксен-везувиановые	волластонит		8,3	10,8
5		диопсид		8,2	10
6		везувиан		7,7	11,8
$T = 300^\circ\text{C}$					
7	Фтор-бериллиевые руды	кварц		13,8	6,8
8		берtrandит		10,2	
9		берtrandит		8,7	
10		калиевый полевой шпат (КПШ)		5,5	
11		доломит	-3,2	13,5	7,5
12		доломит	-1,6	13,5	7,5
13		доломит	-1,3	13	7
14		доломит	-2,9	11,6	5,6
15		ферриторит		0,5	2,9
$T = 200^\circ\text{C}$					
16	Полевошпатовые и кварц-полевошпатовые прожилки	кварц		16	12,4
17		кварц		13,9	10,3
18		кварц		13,5	9,9
19		кварц		12,8	9,2
20		альбит		11,2	2,9
21		КПШ		8,4	
22		КПШ		8,2	
23		КПШ		7,9	
24		альбит		6,3	-2
25		КПШ		6	
26		КПШ		5	
27		кальцит	-1,4	17,5	7,7
28		кальцит	-1,5	15,3	5,5
29		кальцит	-0,4	13	3,2
30		кальцит	-0,6	12,9	3,1

Примечание. Температура, использованная при расчете составов флюидной фазы, для скарнов условно принята 450°C , для фтор-бериллиевых руд и поздних прожилков взята из статьи [1].

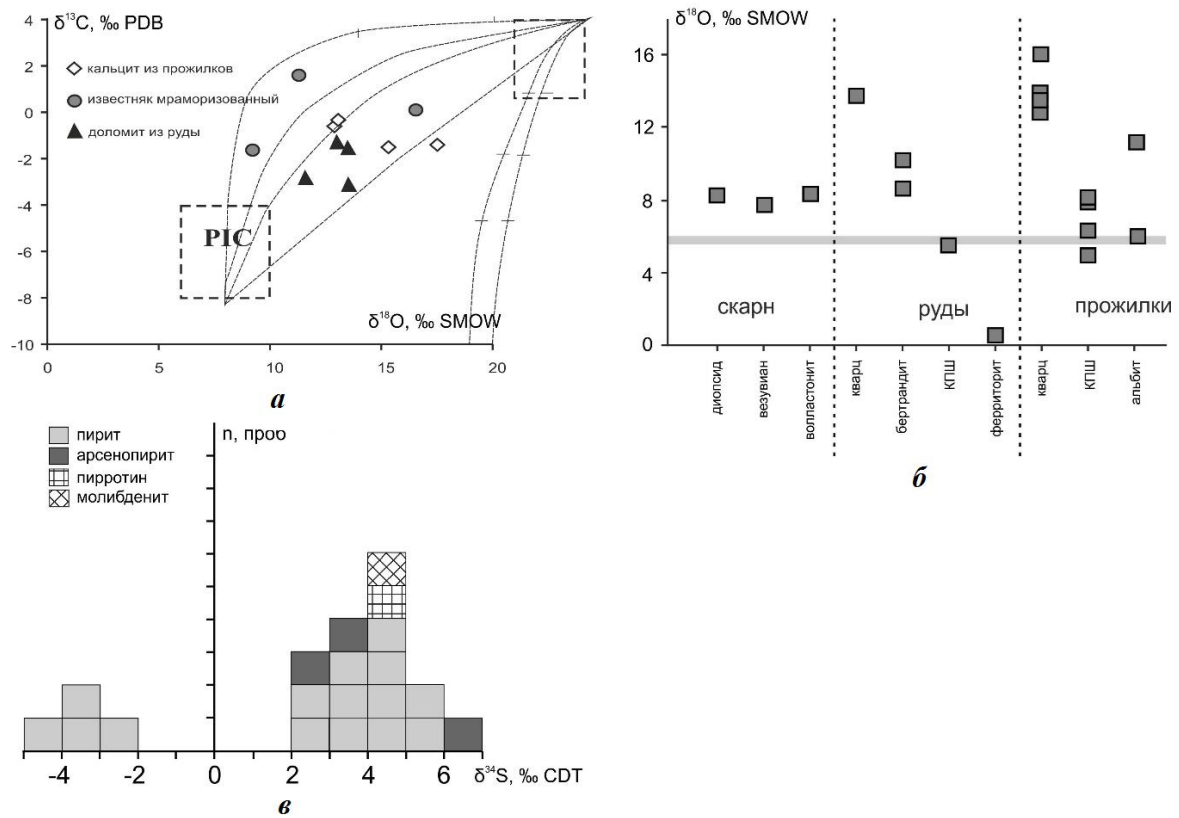


Рис. 4. Диаграммы составов:

а – $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатных минералов. PIC – поле мантийных карбонатов; б – $\delta^{18}\text{O}$ для силикатных минералов. Серой полосой показано значение $\delta^{18}\text{O}$ мантийного источника; в – $\delta^{34}\text{S}$ для сульфидов

Мраморизованные известняки относительно неизменных морских осадочных карбонатных пород резко обогащены легким кислородом. Такое обогащение связано с известным и неоднократно описанным в литературе [5, 6] механизмом их метаморфической рекристаллизации. Оно обусловлено приносом в породы изотопно легкого кислорода.

Изотопные составы кислорода и углерода в карбонатных минералах из рудных парагенезисов относительно однородны и вместе с более гетерогенным составом из прожилков (см. рис. 4, а) ложатся на линии смещения двух резервуаров – осадочных карбонатных пород и мантийной углекислоты.

Изотопный анализ кислорода силикатных минералов показал, что наиболее тяжелым кислородом отличается кварц (16 ‰ $\delta^{18}\text{O}$) из позднего прожилка, а обеднен тяжелым кислородом ферриторит (0,5 ‰ $\delta^{18}\text{O}$). Следует указать на близость значений $\delta^{18}\text{O}$ в кварце

из рудного парагенезиса и из более поздних секущих прожилков (см. рис. 4, б). В полевых шпатах значение $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от 5 до 11,2‰. Близость изотопных составов кислорода в диопсиде, везувиане и волластоните из скарнов отражает их высокотемпературные условия образования.

Вероятным объяснением утяжеления изотопного состава кислорода в силикатных минералах скарнового парагенезиса, а также рудных ассоциаций и кварца пострудной стадии, как и в случае с карбонатами, является извлечение кислорода из изотопно тяжелых вмещающих известняков.

Расчетный изотопный состав кислорода в воде, равновесной с минералами скарнового парагенезиса, показывает на участие в формировании флюидов формационных вод, близких к магматическим водам. Вода, равновесная с минералами рудной стадии, существенно облегчена. В ней кроме ювенильной

Таблица 4

Изотопный состав серы

Номер минерала	Анализируемый материал	Минерал	$\delta^{34}\text{S} \text{ ‰ CDT}$
1	Сульфидизированные граниты и сиениты	пирротин	5,4
2		арсенопирит	4,55
3		пирит	5,1
4		пирит	4,7
5		пирит	4,5
6		пирит	4,3
7		пирит	4,2
8		пирит	3,49
9		пирит	2,14
10	Кварцевые, полевошпатовые и кварц-полевошпатовые прожилки	молибденит	6,5
11		молибденит	3,84
12		молибденит	2,78
13		пирит	5
14		пирит	3,75
15		пирит	3,7
16		пирит	3,6
17		пирит	2,18
18	Вмещающие сланцы	пирит	-2,55
19		пирит	-3,1
20		пирит	-3,8
21		пирит	-4,4

компоненты просматривается также участие метеорной воды. Существенно более гетерогенный состав кислорода из прожилков. В них просматривается как эндогенный источник, так и метеорные воды.

Изотопный состав серы из сульфидов проанализирован в основном в пиритах из разных парагенезисов и менее в пирротине, арсенопирите и молибдените (табл. 4). Он отчетливо фиксирует два источника (см. рис. 4, в). Первый из них (пирит в сланцах), обогащенный легкой серой с отрицательными значениями $\delta^{34}\text{S}$, подобен сере сульфидов из углеродистых толщ, образовавшихся в результате сульфат-редукции в морских бассейнах с застойным гидродинамическим режимом в придонной части. Вторая группа связана с гидротермальными процессами. Она относительно однородна и дистан-

цирована от мантийной метки, лежит в границах корового источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ р_Сибирь_a.

Библиографический список

1. Булнаев К.Б. Фтор-бериллиевые месторождения Витимского плоскогорья: минеральные типы, условия локализации, магматизм, возраст (Западное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2006. № 4 (48). С. 320–334.
2. Возраст рудоносного магматизма Ауникского месторождения Западно-Забайкальской бериллиеносной металлогенической провинции / Д.А. Лыхин, В.И. Коваленко, В.В. Ярмолук, Г.С. Рипп // Доклады академии наук. 2003. Т. 392. № 2. С. 230–234.

3. Гриненко В.А. Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // Журнал неорганической химии. 1962. № 7. С. 578–582.

4. Куприянова И.И., Шпанов Е.П. Бериллиевые месторождения России. М.: ГЕОС. 2011. 353 с.

5. Baertschi P. Messung und Deutung relativer Hilufigkeitsvariationen von O^{18} and C^{13} in Karbonatgesteinen und

Mineralien // Schweiz. Mineral. Petrog. Mitt. 1957. P. 73–152.

6. Denies P., Gold D.P. The change in carbon and oxygen isotopic composition during contact metamorphism of Trenton limestone by the Mount Royal Plutone // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1969. V. 33. I. 3. P. 421–424.

Статья поступила 12.02.2015 г.