

Л. Б. ЗУБКОВ, О. Н. ЛОЖНИКОВА, С. В. ЯКОВЛЕВА

О МИНЕРАЛОГИИ И БЕРИЛЛИЕНОСТИ МАГНЕТИТОВЫХ
СКАРНОВ

Бериллиевые месторождения скарнового типа известны во многих районах земной коры: Айрон Маунтин в США, Сиерра де Кордоба в Аргентине, Гортенколлен в Норвегии, ряд месторождений в СССР и др. (Glass a. o., 1944; Джанс, 1955; Еремеев, 1868; Каленов, 1959; Косалс, 1961). Все они имеют много одинаковых черт в геологическом положении и строении, характеризуются сравнительно постоянным парагенезисом минералов (магнетит, флюорит, гранат, везувиан, слюды, эпидот, бериллиевые минералы — гельвин, хризоберилл, таффеит, реже бавенит, фенакит, берилл) и текстурно-структурными особенностями (характерные полосчато-плойчатые текстуры руд); это и позволило выделить их в четко индивидуализированный генетический тип контактово-метасоматических (скарновых) месторождений бериллия (Беус, 1960; Гинзбург, 1961).

Большинство исследователей, изучавших эти месторождения, считает, что бериллий в них присутствует в виде перечисленных выше собственно бериллиевых минералов, а также частично рассеивается в породообразующих силикатах (везувиане, гранате, слюдах и др.). Однако, как устанавливается по литературным данным, а также нашими исследованиями некоторых бериллиеносных скарновых месторождений, известны случаи, когда этот элемент содержится в скарнах в значительных количествах — до десятых долей процента, но собственно бериллиевые минералы в них отсутствуют, а количество бериллиеносных породообразующих силикатов также далеко не соответствует общему содержанию BeO . Особенно это характерно для магнетитсодержащих скарнов, наиболее обогащенных бериллием из всех известных типов скарновых образований. Во многих случаях устанавливается, что даже в пределах одного и того же месторождения или рудного тела содержания окиси бериллия прямо коррелируются с содержаниями магнетита: чем больше количество этого минерала, тем богаче скарны и по содержанию окиси бериллия.

Однако увеличение количества магнетита и соответствующее повышение содержания BeO вовсе не объясняется наличием в них каких-либо бериллиевых минералов, а связано с присутствием бериллия в самих магнетитах. По вопросу о формах нахождения бериллия в магнетитах, содержащих иногда до 1% BeO , в опубликованной литературе имеется только единственное упоминание А. А. Беуса (1960) о том, что «исследование нерастворимого остатка после обработки магнетита кислотами показало присутствие в нем микроскопических включений хризоберилла». Однако соответствуют ли обнаруженные количества микровключений хризоберилла общему содержанию BeO в исследованных магнетитах — неизвестно. Сведения же о балансовых количественных исследованиях бериллиеносности магнетитсодержащих скарнов с целью количественного установле-

ния всех минералов¹ — носителей бериллия и форм нахождения в них этого элемента в опубликованной литературе вообще отсутствуют. В связи с этим представляют интерес некоторые новые данные по минералогии и бериллиенности магнетитовых скарнов, полученные в результате проведенных нами количественных химико-минералогических исследований бериллиенных скарнов одного из месторождений Советского Союза. Результаты этих исследований и сообщаются в настоящей статье.

Бериллиенные скарны месторождения приурочены к зоне экзоконтакта гранитного массива со своеобразной геохимической специализацией. Граниты характеризуются повышенными содержаниями фтора, бериллия, олова, вольфрама и других редких элементов, т. е. типичным комплексом элементов бериллиенных интрузий. В структурном отношении рудное поле, т. е. зона экзоконтакта массива, представляет собой останец контакто-измененных вмещающих пород в прогибе кровли гранитного массива вдоль его северного контакта. Падение его пологое на север. Глубина чехла осадочно-метаморфических пород в средней части рудного поля достигает 200—250 м. Эти породы, представленные известково-песчано-сланцевой толщей, образуют в пределах кровли крупную синклиналь, осложненную многочисленными более мелкими складками субширотного простирания. Связанные со складчатостью тектонические нарушения разбивают площадь на отдельные блоки и контролируют зоны скарнов. Выделяется несколько рудных скарновых зон, простирающихся в субширотном направлении. В пределах каждой из зон насчитывается по несколько скарновых тел. Они представляют собой линзы, линзовидные жилы, тела неправильной формы различной мощности и протяженности, прослеженные на глубину до первых сотен метров.

Изучение вещественного состава этих скарнов было предпринято с целью установления в них минералов — носителей бериллия и составления количественного баланса распределения этого элемента по минералам скарнов.

Исследования проводили на средних пробах (1—3) весом в несколько десятков килограммов каждая, отобранных по трем наиболее крупным скарновым телам. Пробы по каждому из них были составлены путем непрерывного отбора точечных штучных проб по нескольким сечениям вкрест простирания от висячего бока к лежащему и являются достаточно представительными. Изучение структурно-текстурных особенностей и взаимоотношений минералов проводили на образцах, в прозрачных и полированных шлифах, а исследования химического и количественного минерального составов — на дробленых до 1 мм протолочках средних проб.

Макроскопически скарны трех изучавшихся залежей представлены плотной «тяжелой» породой темно-серого, почти черного цвета, мелко- до микрозернистой структуры, тонкополосчатой, часто пloyчатой текстурой (рис. 1). Состав скарнов, определенный макроскопически в штучках, флюорит-гранат-везувиан-магнетитовый.

Основным минералом является черный магнетит. Он слагает в виде средне- или мелко- и тонкозернистого агрегата участки, полосы и оны различной толщины — от десятых долей миллиметра до первых сантиметров. Участки окаймляются обычно тонкозернистым светло-фиолетовым флюоритом и разделяются полосами, зонками гранат-везувианового состава (рис. 2). Перемежаемостью таких полос магнетита, флюорита, граната, везувиана и обуславливаются полосчатые текстуры скарнов.

Химический состав трех исследованных проб бериллиенных скарнов приведен в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, скарны имеют железо-кремне-кальциевую основу с большим содержанием летучих компонентов (F , CO_2) и характеризуются повышенными содержаниями окиси бериллия. Незначительным распространением пользуются глинозем и щелочные элементы.

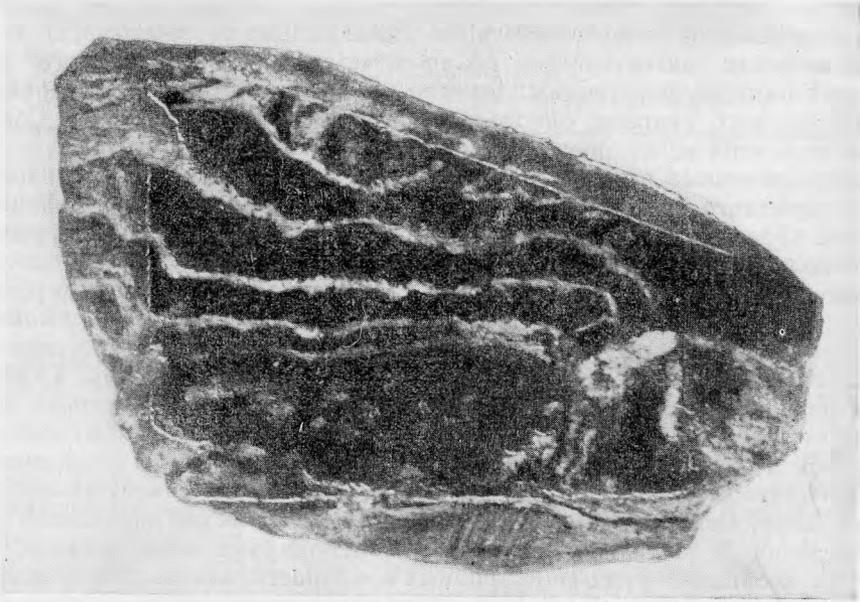


Рис. 1. Тонкополосчатая до плейчатой текстура магнетитовых бериллие-носных скарнов изучавшегося месторождения. Natur. вел.

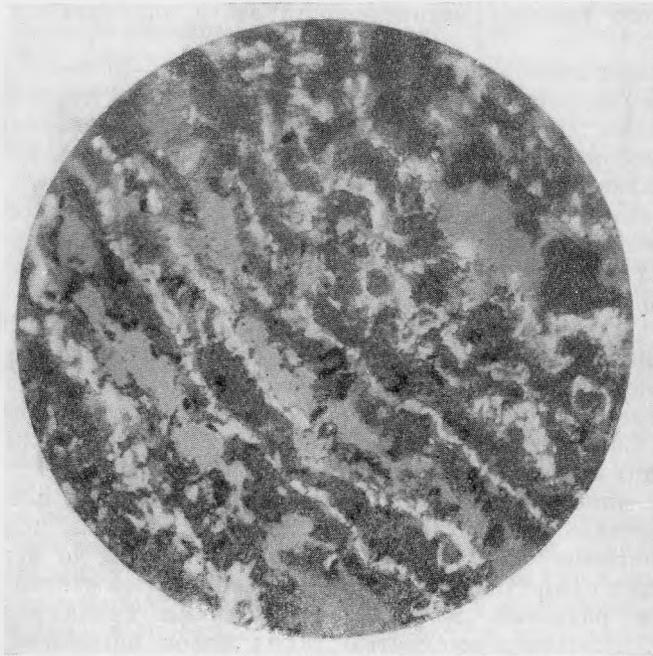


Рис. 2. Переменяемость тонких полос магнетита (светлое), окаймленных флюоритом (темное), с зонами гранат-везувиянового состава (светло-серое). Полированный шлиф, без анализатора. Увел. 126

Химический состав бериллиеносных скарнов, вес. %

Компонент	Проба			Компонент	Проба		
	1	2	3		1	2	3
Основные породообразующие компоненты				Прочие компоненты*			
SiO ₂	18,00	14,70	23,20	ZrO ₂	0,01	0,01	0,01
TiO ₂	0,21	0,22	0,24	SnO ₂	0,03	0,06	0,04
Al ₂ O ₃	2,10	2,60	3,50	BeO	0,21	0,46	0,21
FeO + Fe ₂ O ₃	15,50	29,70	17,00	ZnO	0,31	0,15	0,17
MnO	2,70	1,10	3,38	Li ₂ O	0,17	0,43	0,09
MgO	0,08	0,12	0,11	Rb ₂ O	0,046	0,13	0,021
CaO	33,20	26,54	27,60	Cs ₂ O	0,005	0,005	0,004
Na ₂ O	0,18	0,24	0,27	Ge	0,004	0,0008	0,0006
K ₂ O	0,90	3,00	0,72	In	0,0003	0,0002	0,0002
CO ₂	1,40	0,75	1,30	Ga	0,006	0,011	0,004
F	25,00	19,50	23,00	Tl	<0,0003	<0,0003	<0,0003
				Re	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Итого	99,27	98,47	100,32	Итого	0,723	1,247	0,550
				Всего	99,993	99,717	100,87

* Содержание Pb, Bi, Mo, Ni, Cu и W — тысячные доли процента.

Количественному минеральному анализу подвергли дробленые до 1 мм протопочки средних проб, предварительно расситованные на классы $-1 + 0,5$; $-0,5 + 0,25$; $-0,25 + 0,10$; $-0,10 + 0,074$; $-0,074 + 0,044$ мм и пламы — 0,044 мм. Анализировали протопочки всех классов крупности, начиная с $-1,0 + 0,5$ и до $-0,074 + 0,044$ мм. При этом подготовке к анализу и сам анализ вели по весьма развернутым и сложным схемам, включающим многократные обработки проб в соляной кислоте, последовательные деления нерастворимых остатков в тяжелых жидкостях с удельным весом 2,9; 3,5 и 4,2, электромагнитные перемешки и т. д. Все это предпринимали с целью выявления, диагностики и точного количественного определения в пробах всех бериллиевых и других рудных и породообразующих минералов для составления баланса распределения BeO. Результаты количественных минеральных анализов трех проб бериллиеносных скарнов приведены в табл. 2.

Из сравнения данных табл. 1 и 2 видно, что содержания бериллия в скарнах трех проб (0,21, 0,46 и 0,21% BeO) не соответствуют количеству бериллиевых минералов, установленных в пробах минералогическими анализами. Несмотря на примененную весьма сложную методику количественных минералогических анализов, в пробе 1 не было обнаружено ни одного зерна, а в пробе 3 — всего 0,11% берилла. В более богатой по содержанию BeO пробе 2 установлены берилл и хризоберилл в довольно значительных количествах, однако тоже далеко не соответствующих общему содержанию BeO в пробах (0,46%).

Все эти факты свидетельствуют о том, что основная часть бериллия в изучаемых скарнах не связана с самостоятельными выделениями бериллиевых минералов, а бериллий рассеивается в виде каких-либо соединений в других минералах, слагающих скарны. В связи с этим были детально изучены все скарновые минералы и определены содержания окиси бериллия химическими и количественными спектральными методами в каждом из них.

Таблица 2

Количественный минеральный состав бериллиеносных скарнов, вес. %

Минерал	Проба			Минерал	Проба		
	1	2	3		1	2	3
Магнетит	64,62	64,32	58,28	Эпидот	»	»	0,05
Роговики	9,16	1,00	6,80	Хлорит	»	»	0,02
Слюды	6,10	0,43	4,76	Рутил	»	Не обн.	Ед. зн.
Кальцит	2,57	1,38	1,26	Циркон	»	Ед. зн.	»
Флюорит	2,55	2,64	5,94	Топаз	Не обн.	»	»
Гранат	1,50	3,28	3,80	Пирит	Ед. зн.	0,02	0,01
Турмалин	0,90	0,15	0,05	Галенит	Не обн.	0,03	0,01
Кварц, полевые шпаты	0,78	4,00	6,50	Сфалерит	»	Ед. зн.	0,01
Доломит	0,38	Ед. зн.	0,30	Молибденит	»	»	Не обн.
Гидроокислы же- леза	0,20	1,56	1,03	Шпинель	»	»	Ед. зн.
Везувиан	0,20	0,31	0,30	Берилл	»	1,41	0,11
Датолит	Ед. зн.	Не обн.	Не обн.	Хризоберилл	»	0,21	Не обн.
Волластонит	»	Ед. зн.	0,02	Шламы — 0,044 мм	11,95	19,32	11,93
				Итого	100,00	100,00	100,00

При исследованиях минералов, находящихся обычно в тонких взаимопрорастаниях друг с другом, кроме обычных физико-оптических методов и избирательного растворения, для расшифровок фазового состава и диагностики широко использовали и рентгеноструктурный анализ. Его применяли также для обнаружения субмикроскопических включений бериллиевых минералов в магнетите, везувиане, гранате и др. Рентгеновский фазовый анализ проводили на порошках по методу Дебая на аппарате УРС-70 в излучениях трубок с хромовым и медным анодами без фильтра в камере диаметром 57,3 мм.

Результаты исследований бериллиеносности всех минералов скарнов излагаются ниже.

Магнетит, образующий тонкие взаимопрорастания с флюоритом, везувианом, гранатом, кальцитом, слагает, как упоминалось, полосчатые зоны и отдельные полосы в скарнах и, кроме того, содержится в них отдельными изометрическими участками и скученными скоплениями. Магнетит встречается также в виде тончайшей пылевидной вкрапленности и узорчатых петель, окаймляющих по границе выделения отдельных силикатов (рис. 3).

Как видно из данных табл. 2, магнетит является основным минералом скарнов. Однако количество его, определенное минеральным анализом дробленных до 1 мм протолочек, завышено, так как почти во всех классах крупности магнетит образует тонкие сростания с флюоритом, кальцитом, везувианом и другими минералами, и по существу в табл. 2 под магнетитом, количество которого в отдельных пробах колеблется от 58 до 64%, следует понимать тонкозернистые агрегаты названных выше минералов, находящихся в теснейшем взаимопрорастании.

Изучение магнетита в полированных шлифах под микроскопом показало наличие в нем тонких выделений ильменита вытянутой формы, что позволяет диагностировать его как титаномагнетит со структурой распада твердого раствора. Иногда по периферии зерен и внутри них по микротрещинам развивается гематит.

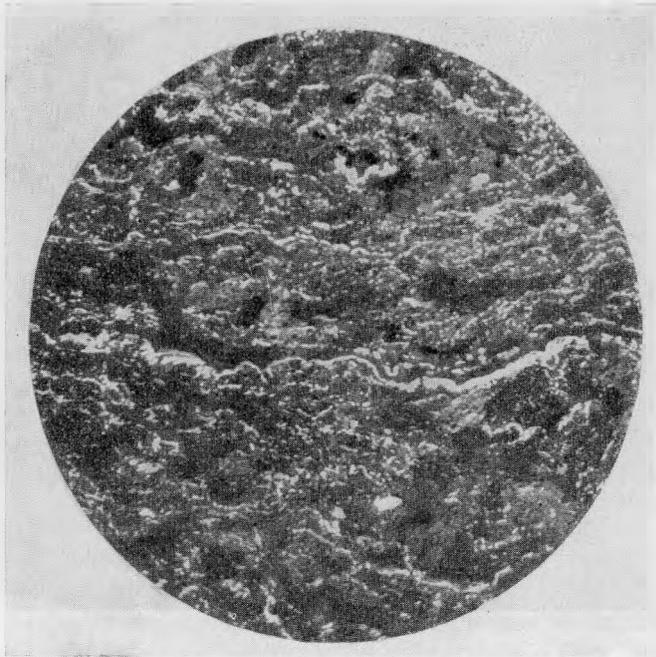


Рис. 3. Субмикроскопические полосчатые и петельчатые выделения магнетита (светлое) в гранат-везувиан-флюоритовом агрегате скарнов (серое). Полированный шлиф, без анализатора, иммерсия. Увел. 240

Химические анализы чистых монофракций магнетита, макроскопически свободного от включений посторонних минералов, показали необычно высокие содержания окиси бериллия — в среднем 0,25% BeO в магнетитах из проб 1 и 3 до 0,80% BeO в пробе 2. Микроскопическими исследованиями магнетитов из проб 1 и 3 никаких включений бериллиевых минералов не обнаружено, а в магнетитах из пробы 2 были определены микровключения хризоберилла. Спектральными анализами в магнетитах кроме бериллия обнаружены следующие элементы-примеси: Ca, Ti > 1%, Mn, Cr, Zr, Pb 0,01—0,1%; Ni, Co, Cu, Zn, Tl 0,001—0,01%.

Рентгеноструктурное изучение чистых монофракций магнетита показало наличие в нем трех фаз: титаномагнетита, флюорита и гематита. Линий каких-либо самостоятельных бериллиевых минералов на дебаграммах магнетита не обнаружено.

Изучение других скарновых минералов показало, что многие из них, так же как и магнетит, несут повышенные содержания окиси бериллия. Наибольшей бериллиеностью отличаются основные минералы скарнов — везувиан, гранат, слюды и др.

Везувиан является типоморфным минералом изученных скарнов. Он образует столбчатые кристаллы, желто- или зеленовато-бурые, собранные в тонколучистые агрегаты (рис. 4), сросшиеся с гранатом, флюоритом, турмалином. Нередко по везувиану развиваются замещающие его слюды — биотит, хлорит; по трещинкам — эпидот, который иногда нацело замещает его, образуя тонкодисперсные агрегаты.

По данным химических анализов содержание BeO в везувианах составляет 0,2% (проба 1), 0,054% (проба 2) и 0,25% (проба 3). Наличие высоких содержаний бериллия в везувианах является общеизвестным фактом и объясняется изоморфным вхождением этого элемента в силикатные минералы. В процессе скарнирования происходит захват ими бериллия

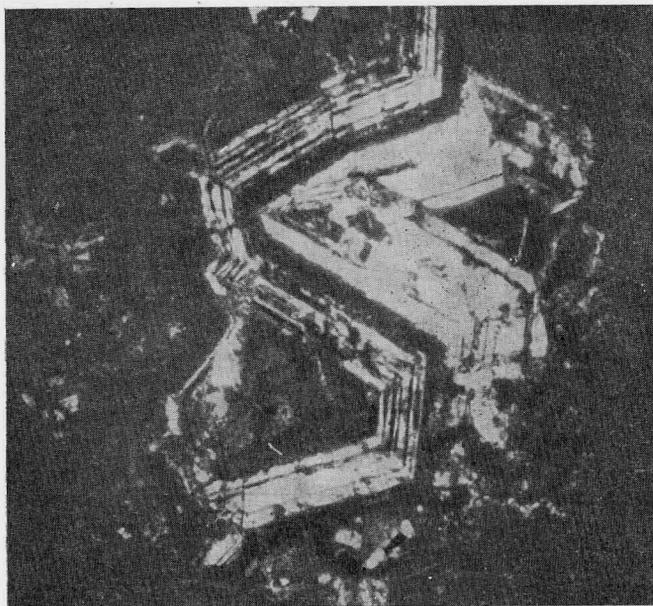


Рис. 4. Зонально-анизотропное строение граната. Прозрачный шлиф. Увел. 80

в качестве изоморфной примеси, что препятствует образованию собственных бериллиевых минералов. По литературным данным (Беус, 1960), содержания бериллия в везувианах из скарнов различных районов СССР колеблется от 0,0076 до 0,54%.

Гранат является также одним из основных типоморфных минералов скарнов. В тех или иных количествах он присутствует во всех разновидностях скарнов и образует даже почти мономинеральные прослойки во флюорит-везувиан-гранатовых скарнах. В изученных пробах магнетитовых скарнов гранат является одним из распространенных минералов, встречаясь в среднем на пробу в количестве от 1,5 до 4,0%, а на некоторых участках скарновых залежей — до 15—25%.

В магнетитовых скарнах гранат образует: 1) скопления сливного характера, состоящие из агрегатов неправильных кристаллов в теснейшем взаимопрорастании с флюоритом, магнетитом, эпидотом и другими минералами; 2) прожилки от десятых долей до первых сантиметров, секущие породу в различных направлениях; 3) отдельные кристаллы додекаэдрическо-гранеидальной формы, часто с равномерно развитыми гранями; размер их — десятые доли миллиметра. Цвет граната обычно желто-бурый, иногда светло-желтый; в шлифах — серый, прозрачный.

Замечательной особенностью граната изученных скарнов является его аномальный анизотропизм. В скрещенных николях под микроскопом видно зонально-анизотропное строение гранатов, состоящих из ряда зон с различным двупреломлением (см. рис. 4). Величина их колеблется от 0,05 до 0,10 мм.

* Удельный вес граната равен 3,5—4,20. Он обладает повышенной магнитной восприимчивостью. Показатель преломления 1,735. По своим физическим свойствам, а также по данным рентгеноструктурного анализа диагностируется как гроссуляр. Он является наиболее ранним минералом скарнов, так как наблюдаются его замещение и коррозия флюоритом, кальцитом, хлоритом и эпидотом.

Содержание BeO в гранатах сравнительно постоянно и составляет: 0,01% (проба 1), 0,06% (проба 2), 0,02% (проба 3).

Флюорит играет весьма существенную роль в составе скарнов. Присутствуя в средних пробах в свободных зернах в количестве до 5—6%, а в тонкозернистых сростаниях с магнетитом и другими минералами — в еще больших количествах, он образует иногда почти мономинеральные зонки, полосы и участки в скарнах. В основном же флюорит совместно с везувианом и гранатом слагает узкие полоски (до 0,25 мм), перемежающиеся с извилистыми тонкими прослойками магнетита. Здесь он обычно мелкокристаллический, цвет светло-фиолетовый, иногда до белого, иногда светло-зеленоватый. Люминесцирует в катодных лучах зеленым цветом.

Встречаются и более поздние разности темно-фиолетового флюорита, образующего довольно крупные кристаллы (до 0,5 см в поперечнике), иногда абсолютно прозрачные, в пустотах более позднего кристаллического кварца или в кальцитовых, тоже более поздних прожилках.

Химическим анализом в ранних скарновых флюоритах установлены тысячные до первых сотых долей процента содержания BeO : для флюорита из пробы 1—0,006%, из пробы 2—0,03%, из пробы 3—0,006%. Полным спектральным анализом в них обнаруживаются примеси Fe, Mg, Si, Al в количестве сотых долей процента; Mo, Ti, Cu — в тысячных долях процента.

Слюды, обнаруженные в скарнах в количестве до первых процентов, представлены в основном мусковитом и биотитом. Собственно скарновым минералом является мусковит, а биотит в скарнах имеет очень небольшое распространение и присутствует в пробах в основном за счет роговиков и других древних нескарнированных пород, оставшихся в пределах скарновых тел в виде отдельных останцов и ксенолитов.

Мусковит обособляется в скарнах в виде разобщенных небольших скоплений крупнопластинчатых агрегатов, иногда в прослойках небольшой мощности (до 0,5 см), где ассоциирует с хлоритом, флюоритом, турмалином.

Содержание окиси бериллия в мусковитах незначительно и составляет во всех пробах 0,006%. Спектральным анализом в нем обнаружены следующие элементы-примеси: 0,1—1% (Ca, Na, Ti, Zr, Ge), 0,01—0,1% (Mn, Zn), 0,001—0,01% (Ni, Cu, In, Tl).

Турмалин присутствует во всех разновидностях скарнов в количестве от сотых долей процента до 1%. Встречается как в виде скрытокристаллических масс и бесформенных скоплений, так и в виде агрегатов столбчатых кристаллов, иногда радиально-лучистых, а также в виде отдельных удлинено-призматических кристаллов до 0,5 см длиной.

Обычно турмалин представлен шерлом черного цвета, в осколках просвечивает темно-бурым цветом; иногда зональной окраски: более темной в центре и светлой по периферии кристаллов. В шлифах прозрачный, сильно плеохроирует от светло-бурого до индигово-синего. Показатель преломления 1,69.

Содержания BeO в турмалине колеблются от тысячных долей процента (0,003% в пробе 1 и 0,004% в пробе 3) до десятых долей процента (0,3% в пробе 2). Кроме бериллия, полным спектральным анализом в нем обнаружены больше 1% Si, Al, Mg, Ca, Fe; 0,1—1% Zn; 0,01—0,1% Ti, Ni.

Из других собственно скарновых минералов, встречающихся в пробах в весьма ограниченных количествах (в основном в тысячных долях процента, до 0,01%) и содержащих бериллий, следует отметить эпидот, топаз, хлорит и некоторые сульфиды.

Эпидот образует тонкозернистые агрегативные скопления и отдельные короткопризматические зерна лимонно-желтого и зеленовато-желтого цветов. Содержания BeO в эпидотах из проб 1 и 2 составляют 0,02%, из пробы 3 — 0,07%.

Т о п а з присутствует в виде отдельных мелких зерен, прозрачных, бесцветных, с сильным стекляннм блеском. Бериллий в нем не обнаружен.

Х л о р и т наблюдается в разбросанных по породе мелких чешуйках зеленого цвета. Содержание BeO в хлоритах из проб 1—3 составляет соответственно 0,05; 0,008 и 0,01%.

С у л ь ф и д ы, в основном пирит и галенит, реже сфалерит и халькопирит, встречаются в виде отдельных идиоморфных кристалликов размером до десятых долей миллиметра по трещинкам в скарнах.

Кроме собственно скарновых минералов, перечисленных и охарактеризованных выше, в средних минеральных пробах изучавшихся залежей встречены такие минералы, как кальцит, кварц, полевые шпаты, связанные с более поздними, секущими прожилками кальцитового и кварц-полевошпатового составов. Мощность их составляет обычно первые сантиметры. В кварц-полевошпатовых прожилках встречаются мелкие кристаллики берилла. Установленные в пробах 2 и 3 незначительные количества берилла, описание которого будет приведено несколько ниже, следует относить главным образом за счет присутствия его в кварц-полевошпатовых прожилках, попавших в средние пробы скарновых рудных тел при опробовании. В этих же прожилках, кроме того, встречаются волластонит и пренит, а в кальцитовых — датолит и доломит.

Все наложенные минералы скарнов отличаются исключительно низкими содержаниями окиси бериллия — обычно около 0,003% и менее. Это свидетельствует о том, что основное количество этого элемента участвовало в скарновом процессе при внедрении бериллиеносной интрузии и рассеивалось по скарновым минералам. С постскарновыми образованиями связано небольшое количество бериллия, представленное главным образом редкими мелкими кристаллами берилла в кварц-полевошпатовых прожилках, секущих скарны.

В изучавшихся пробах скарнов в довольно значительных количествах (от 1 до 10%) встречаются обломки древних роговиков, оставшихся неизменными при скарнировании известково-метаморфической толщи.

Р о г о в и к и представлены темно-серой, иногда зеленовато-серой породой, плотной, массивной обычно тонкозернистой структуры, с прослоями и прожилками толщиной 1—10 мм сахаровидного кварца. Вокруг них наблюдаются тонкая мусковитовая оторочка и скопления серицитоподобной слюды. При наличии большого количества биотита, обычно ориентированного в одном направлении, роговики приобретают гнейсовидную текстуру.

Роговики представлены мелко-, чаще тонкозернистой породой, и в зависимости от минерального состава слагающих ее компонентов микроскопически можно выделить несколько их разновидностей: 1) пироксен-биотит-полевошпатовые роговики; 2) кварц-биотит-хлоритовые; 3) хлорит-кварц-полевошпатовые; 4) эпидот-цоизит-хлоритовые.

Содержание во всех разновидностях роговиков окиси бериллия постоянно и составляет по данным химических анализов этих пород 0,003%, т. е. на порядок превышает кларк этого элемента. Спектральным анализом в роговиках обнаружены следующие элементы: больше 1% Si, Al, Mg, Ca; 0,1—1% Fe, Ti; 0,01—0,1% Zn; 0,001—0,01% Be, Sn, Ni.

С этими роговиками связано присутствие в средних пробах скарнов таких минералов, как пироксен, биотит, хлориты, а также аксессуарии роговиков — рутил, циркон, шпинель. Сведения о формах выделения этих минералов, их физических свойств и бериллиеносности помещены в табл. 3.

Обращает на себя внимание факт довольно высокого содержания окиси бериллия в минералах роговиков — от 0,006 до 0,07%. Возможно, именно эти древние породы, будучи контаминированы гранитной магмой, были источником бериллия в гранитах и обусловили высокую бериллиено-

Краткая характеристика и бериллиенность минералов древних нескарнированных роговиков

Минерал	Краткая характеристика	Содержание BeO , % в минералах из проб		
		1	2	3
Пироксены	Шестоватые и неправильные удлинённые зерна 0,1—0,25 мм. Бесцветные и зеленоватые. В шлифах бесцветен, угасание косое. По дебаеграмме — диоксид-авгит	Не анализировали		
Биотит	Небольшие чешуйки черного цвета и их скопления	0,024	0,006	0,011
Хлорит	Скопления мелких чешуек, иногда розетковидные, зеленой окраски. Сильный плеохроизм в зеленоватых тонах пеннин	0,05	0,02	0,01
Эпидот	Тонкозернистые плотные агрегативные скопления до 1 мм и рассеянные выделения. В шлифах лимонно-желтого цвета с ярким плеохроизмом в желтовато-зеленых тонах. Пистацит	0,02	0,07	0,02
Шпинель	Изометричные зерна темно-зеленого цвета с уд. весом 3,5—4,2 г/см ³ . Изотопный, $N = 1,72$. По дебаеграмме — цинковая разновидность, крейтонит	Не анализировали		
Рутил	Короткостолбчатые кристаллы размером 0,07—0,1 мм, темно-красного цвета с сильным блеском. Уд. вес 4,2 г/см ³	»	»	
Циркон	Мелкие кристаллики бипирамидального облика с узким пояском призмы, буровато-розового цвета	»	»	

ность последних. Внедрение интрузии этих гранитов привело к скарнированию карбонатных пород древней толщи и переотложению в них бериллия.

Среди собственных бериллиевых минералов скарнов обнаружены и изучены хризоберилл и берилл.

Х р и з о б е р и л л — очень редкий минерал скарнов. Присутствует только в виде мельчайшей редкой вкрапленности в магнетите и реже в самих скарнах без связи с магнетитом, притом всего лишь в одной пробе 2. При просмотре большого количества шлифов хризоберилл в скарнах в виде свободных выделений в породообразующих минералах обнаруживается исключительно редко. Он был установлен в магнитных фракциях всех классов крупности пробы 2, наиболее богатой по содержанию BeO , после продолжительного травления их в кипящей соляной кислоте, разбавленной 1 : 1. Травление проводили с целью растворения кальцита, доломита, магнетита. Нерастворимые остатки подвергали делению в тяжелых жидкостях. Хризоберилл был обнаружен в легких фракциях нерастворимых остатков при разделении в жидкости Клеричи, т. е. с удельным весом 3,5—4,2.

Зерна хризоберилла — неправильной, часто пластинчатой формы и с поверхности сильно корродированы. Иногда пластинки хризоберилла образуют плотные агрегаты, состоящие из плоских табличек, образующих «щетки». Пластинки часто сдвойникованы и стройникованы, уплощены перпендикулярно плоскости срастания и покрыты штриховкой. Отмечались пластинки, имеющие шестигранное строение. Цвет хризоберилла грязно-бурый и темно-серый, блеск стеклянный, тусклый. Зерна хрупкие, слабо просвечивают в тонких сколах. Средний показатель преломления, измеренный в иммерсионных препаратах, равен 1,748; двупреломление низкое, не плеохроирует, одноосный (+).

В кислотах нерастворим. Пластинки хризоберилла, составляющие агрегаты размером от сотых долей миллиметра до 0,25 мм, сцементированы труднорастворимыми минералами (флюоритом, адуляром) и всегда содержат тончайшую вкрапленность магнетита порядка нескольких микрон и менее.

Химическим анализом в хризоберилле обнаружены (в пересчете на 100%) 17,82% BeO и 82,18% Al_2O_3 . Спектральным анализом в хризоберил-

ле обнаружены 0,1—1% Si, Fe; 0,01—0,1% Mg, Mn, Zn, Zr; 0,001—0,01% Ti, Cu; минерал подтвержден рентгеноструктурным анализом.

Берилл макроскопически был обнаружен в виде мелких кристаллов размером от 0,1 до 0,5 мм в полевошатовом прожилке, секущем тонкозернистый магнетитовый скарн. Бериллу сопутствовали мелкие чешуйки светлой слюды и кристаллики черного турмалина размером до 0,1 мм. В прожилке берилл призматической формы, нежно-голубого цвета, прозрачный.

В протолочках средних минеральных проб скарнов берилл был обнаружен только в пробах 2 и 3, в легких фракциях всех классов крупности от 0,5 мм этих проб после обработки их в кипящей соляной кислоте, разведенной 1 : 1, для удаления гидроокислов железа и магнетита. Основное количество берилла в дробленых протолочках сосредоточивается в классах от —0,25 до + 0,07 мм. Здесь он представлен обломками призматических кристаллов и зернами неправильной формы, как правило, угловатыми. В осколках прозрачной, со стекляннным блеском, бесцветной или светло-голубой окраски. Некоторые зерна берилла содержат чешуйки светлой слюды. В прозрачных шлифах и иммерсионных препаратах бесцветный. Содержание BeO в нем 14%.

Установление количественного минерального состава бериллиеносных скарнов трех различных залежей и исследования бериллиеносности всех слагающих их минералов позволили рассчитать количественный баланс распределения бериллия по минералам изученных скарнов (табл. 4).

Как видно из данных табл. 4, основное количество окиси бериллия в гранат-везувиан-флюорит-магнетитовых скарнах проб 1 и 3 связано с магнетитом и лишь в пробе 2 — также с бериллом и хризобериллом. Значительное количество BeO рассеивается по пороодообразующим минералам.

В связи с большими относительными количествами окиси бериллия, заключенными в магнетите, остановимся несколько подробнее на характеристике его бериллиеносности. Содержание BeO в магнетитах принято нами 0,25%. Непосредственные химические анализы магнетитов из проб 1 и 3 давали в среднем эту цифру при колебаниях от 0,20 до 0,35%. Химический анализ монофракции магнетита из пробы 2 показал более высокое содержание BeO в нем — до 0,38%, а магнетитовые монофракции из более крупных классов пробы (до + 0,25 мм) содержали 0,5—0,8% BeO. Растворение магнетитов из этой пробы в соляной кислоте, анализ фильтратов и изучение нерастворимых остатков показали, что в растворившейся части монофракции, т. е. в чистом магнетите, содержание BeO также составляет 0,25%, а нерастворимые остатки содержат от 1 до 3% BeO, связанной главным образом с имеющимися в них хризобериллом, отчасти — бериллом.

В магнетитах из проб 1 и 2 находится 0,25% окиси бериллия в виде соединений, растворяющихся в соляной кислоте одновременно с ним самим. Дробное последовательное травление магнетитовых монофракций в кипящей HCl концентрации 1 : 20, 1 : 10, 1 : 5 и 1 : 1 показало, что растворение магнетита начинается в соляной кислоте, разбавленной 1 : 10, когда растворяется не более 15% его, и заканчивается полностью в HCl, разбавленной 1 : 5. Анализы фильтратов на BeO и соответствующие пересчеты показали, что с фильтрами HCl 1 : 10 и 2 : 5 в пробах 1 и 3 связано соответственно 1—15 и 80—98% окиси бериллия от общего количества. Остальное заключено в нерастворимые остатки, в которых содержание BeO не превышает 0,01—0,05%, а выход колеблется от 13 до 18%. Нерастворимые остатки представлены продуктами изменения пороодообразующих минералов (везувиана, граната, флюорита, полевых шпатов) с рассеянным бериллием. Никаких собственных бериллиевых минералов в них не обнаружено. Исключение, как упоминалось, представляют нерастворимые остатки пробы 2, в которых были обнаружены хризоберилл

Баланс распределения окиси бериллия по минералам магнетитовых скарпов
на примере трех средних минеральных проб, отобранных из различных скарновых залежей района

Минерал	Проба 1				Проба 2				Проба 3			
	содержание минерала в пробе	содержание BeO в минерале	количество BeO в пробе за счет минерала		содержание минерала в пробе	содержание BeO в минерале	количество BeO в пробе за счет минерала		содержание минерала в пробе	содержание BeO в минерале	количество BeO в пробе за счет минерала	
			абс.	отн.			абс.	отн.			абс.	отн.
Магнетит	64,62	0,25	0,1612	85,89	64,32	0,25	0,1608	34,057	58,28	0,25	0,1457	78,16
Роговики	9,16	0,003	0,0003	0,16	1,00	0,003	0,00003	0,006	6,80	0,003	0,0002	0,11
Слюды	6,10	0,024	0,0015	0,80	0,43	0,006	0,00002	0,004	4,76	0,007	0,0003	0,16
Кальцит	2,57	0,003	0,0001	0,05	1,38	<0,003	—	—	1,26	0,003	<0,0001	<0,01
Флюорит	2,55	0,006	0,0002	0,11	2,64	0,03	0,0008	0,168	5,94	0,006	0,0004	0,22
Гранат	1,50	0,003	0,0001	0,05	3,28	0,06	0,0020	0,424	3,80	0,020	0,0008	0,43
Кварц, полевые шпаты	0,78	0,003	—	—	4,0	0,003	—	—	6,50	0,003	0,0002	0,11
Доломит, гидроокиси железа	0,58	0,003	0,0001	—	1,55	0,003	—	—	1,33	0,003	<0,0001	<0,01
Везувиап	0,20	0,20	0,0004	0,22	0,31	0,054	0,0017	0,360	0,30	0,25	0,0007	0,38
Турмалин	Зн.	0,003	—	—	0,15	0,30	0,0045	0,955	0,05	0,004	<0,0001	<0,01
Датолит	»	0,003	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Волластонит	»	0,008	—	—	Зн.	0,008	—	—	—	—	—	—
Эцидот	»	0,02	—	—	»	0,07	—	—	0,05	0,002	<0,0001	<0,01
Хлорит	»	0,05	—	—	»	<0,00>	—	—	—	—	—	—
Берилл	»	—	—	—	1,406	14,00	0,1968	41,682	0,11	14,00	0,0154	8,26
Хризоберилл	—	—	—	—	0,214	17,82	0,0381	8,068	—	—	—	—
Шламы — 0,044 мм	11,95	0,20	0,0239	12,72	19,32	0,35	0,0674	14,276	11,93	0,19	0,0227	12,17
Итого	100,00	—	0,1877	100,00	100,00	—	0,47215	100,00	100,00	—	0,1869	100,00

и берилл. Микровключения этих минералов и обуславливают высокие (до 0,8%) содержания BeO в магнетитах из этой пробы.

Таким образом, можно заключить, что в чистом магнетите содержится в виде соединений, растворяющихся в HCl одновременно с ним самим, строго определенное и постоянное количество окиси бериллия — порядка 0,25%. Из растворимых в этих условиях минералов бериллия можно отметить лишь гельвин и бромеллит. В гельвине по теоретическому составу (Беус, 1960) содержится 13,52% BeO ; 51,12% MnO ; 32,46% SiO_2 ; 5,78% S ; отношения $\text{BeO} : \text{Mn}$ и $\text{BeO} : \text{S}$ равны 1 : 3,8 и 1 : 0,4. Анализ монофракции чистого магнетита с содержанием 0,25% BeO показал, что в нем содержится 1,3% MnO и 0,08% S , т. е. отношения в нем $\text{BeO} : \text{MnO}$ и $\text{BeO} : \text{S}$, равные, соответственно, 1 : 5,2 и 1 : 0,32, близки к теоретическим для гельвина. Таким образом, можно предположить, что 0,25% BeO в магнетите, переходящие в фильтрат одновременно с растворением самого магнетита, частично связаны с тонкодисперсными включениями гельвина не обнаруживаемого ни оптически, ни рентгеновским методом. Однако в связи с дефицитом серы в исследованных магнетитах не исключается возможность и нахождения небольшой части бериллия в магнетите в виде тонкораспыленной окиси бериллия — минерала типа бромеллита. Все остальное количество бериллия сверх 0,25% BeO содержится в магнетите в виде субмикроскопических и микроскопических включений хризоберилла, отчасти берилла, увеличивающих общее содержание BeO до 0,5—0,8%.

ВЫВОДЫ

Устанавливается, что в магнетитовых скарнах высоким содержаниям BeO (до нескольких десятых долей процента) не всегда отвечают соответствующие количества бериллиевых минералов.

Изучение вещественного состава гранат-везувиан-флюорит-магнетитовых скарнов из трех различных скарновых залежей одного месторождения показало идентичность их состава и связь основного количества бериллия с породообразующими минералами скарнов — магнетитом, везувианом, гранатом и др.

Основная часть бериллия в них (до 86% отн.) заключена в магнетитах, содержащих 0,25% BeO в форме соединений, растворяющихся в соляной кислоте одновременно с ним самим и полностью переходящих в фильтрат. В нерастворимых остатках бериллиевые минералы отсутствуют. Предполагается, что эти 0,25% BeO в магнетите могут быть связаны с тонкодисперсным гельвином, частично — с бромеллитом. Но не исключаются и другие растворимые в HCl формы нахождения бериллия в магнетите.

Магнетиты отличаются постоянством содержаний окиси бериллия (0,25%), находящейся в них в виде соединений, растворяющихся в соляной кислоте одновременно с магнетитом. Более высокие (сверх 0,25%) содержания BeO в магнетите обуславливаются наличием в них микровключений хризоберилла, очень редко — берилла, который иногда встречается и в виде мелких кристалликов в более поздних секущих скарны кварц-полевошпатовых прожилках.

Установленный характер бериллиености изученных скарнов предопределяет их отрицательные перспективы как возможного источника сырья для получения бериллия, но является интересным геохимическим фактом, еще раз доказывающим, что участие бериллия в процессе скарнообразования ограничивается вхождением его в том или ином виде в породообразующие минералы, причем не только силикаты (везувиан, гранат), но и в окислы (магнетит), и характеризуется крайней ограниченностью в образовании собственных бериллиевых минералов.

ЛИТЕРАТУРА

- Беус А. А. Геохимия бериллия и генетические типы месторождений. Изд-во АН СССР, 1960.
- Георгиевская О. Г. К вопросу о генезисе ритмично-витиевато-полосчатой текстуры рудных тел некоторых контактово-метасоматических месторождений.— Докл. АН СССР, 1955, 101, № 5.
- Гинзбург А. И. Факторы, благоприятствующие концентрации редких элементов.— Сб. «Типы месторождений редких элементов и их поисковые признаки», 1961, вып. 14.
- Джанс Р. Г. «Рибон-рок» — необычные бериллиеносные такситы.— В кн. «Геохимия, минералогия и месторождения бериллия (бериллий 3)». ИЛ, 1955.
- Еремеев П. В. Описание гельвина из Люпикко и Урала.— Горный журнал, 1868, ч. IV.
- Каленов А. Д. О составе минералов гельвиновой группы.— Труды ИМГРЭ АН СССР, 1959, вып. 3.
- Косалс Я. А. О гельвиноносном типе скарновых месторождений.— Геол. и геофиз. 1961, № 2.
- Glass J. J., Janhs R. H., Stevens R. E. Helvite and danalite from New Mexico and the helvite group.— Amer. Miner., 1944. 29, N 5—6.