

М. Е. ЯКОВЛЕВА

ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ БЕРИЛЛА

При исследовании редкометалльных пегматитов патрово-литиевого типа (по А. Е. Ферсману) в одном из районов Сибири было обращено внимание на характер более позднего изменения берилла.

Пегматитовые жилы залегают в биотитовых сланцах и амфиболитах и характеризуются следующими особенностями: 1) необычайно сильно проявленной альбитизацией; 2) отсутствием первичной зональности, хотя дифференциация при кристаллизации пегматитов имела место, на что указывают встречающиеся в центральных частях пегматитовых тел крупные блоки микроклина и более мелкие, но также блоковые, выделения кварца; 3) полосчатой текстурой, обусловленной наличием серии параллельных, согласных с простиранием пегматитовых тел, прожилков, состоящих из кварцево-лепидолитового, кварцево-сподуменового и альбитового агрегата, причем последний представлен несколькими разновозрастными образованиями; 4) наличием поздних тонких (1—7 мм) флюоритовых и микроклинно-альбито-флюоритовых прожилков, секущих пегматитовые тела вкрест простирания.

Выделения берилла приурочены к блокам кварца и ассоциируют с амблигонитом, зеленым турмалином, реже рубеллитом и колумбит-танталитом. Форма выделений берилла неправильная, размер от 1—2 до 30 см в поперечнике. Цвет в основном белый, но иногда светло-желтоватый. В составе берилла методом пламенной фотометрии (аналитик И. Колосова, ИГЕМ АН СССР) определено содержание редких щелочей в двух образцах из разных пегматитовых тел: Li_2O 0,41%; Rb_2O 0,05—0,07%; Cs_2O 0,45—0,87%.

Спектральным анализом установлены Ca (от 0,6 до 0,1%), Mg (от 0,1 до 0,01%), Fe (от 0,6 до 0,01%), Mn и Ga (от 0,01 до 0,001%), Ti (от 0,006 до 0,001%).

Светопреломление берилла $N_g = 1,585—1,587$; $N_m = 1,580$, одноосный; уд. вес. = 2,72.

Контакты берилла с блоковым кварцем резкие и четкие. Взаимоотношения же его с альбитовым замещающим комплексом реакционные. Растворяя берилл, альбит образует в нем обособленные участки, которые либо сохраняют единую с основным зерном оптическую ориентировку, либо ориентировка нарушается, зерна дорастают и приобретают идиоморфные формы (рис. 1).

Редко встречается неизменный берилл, лишенный вторичных продуктов. Обычно он в той или иной степени претерпевает изменения, связанные с более поздней, гидротермальной, фазой пегматитового процесса. По бериллу развиваются преимущественно альбит и калиевый полевой шпат (с

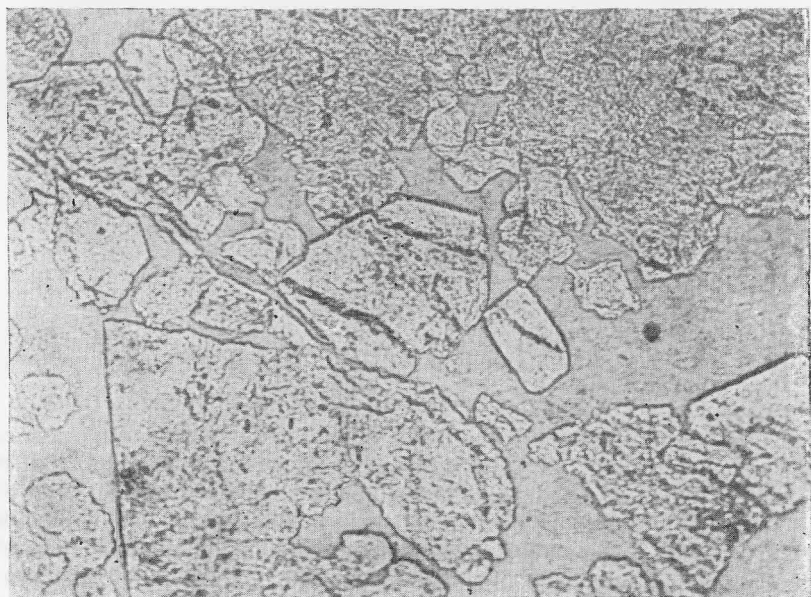


Рис. 1. Разъедание берилла (высокий рельеф) альбитом. При одном цикле; увел. 6

малым углом оптических осей) типа адуляра, в меньшем количестве берtrandит, редко фенацит, мусковит и флюорит.

Альбит и калиевый полевой шпат замещают берилл как порознь, так и вместе, причем замещение альбитом наблюдается чаще. Оба полевых шпата развиваются то в виде четко ограниченных прожилков, то в виде причудливых ветвящихся образований, в некоторых случаях сплошь пронизывающих зерна берилла. Характер ветвящегося альбита, замещающего берилл, виден на рис. 2. Полевые шпаты в большем или меньшем количестве всегда обнаруживаются в бериллах, подвергшихся изменению. Однако даже в тех случаях, когда они являются основными минералами, развивающимися по бериллу, их сопровождает переменное количество берtrandита, присутствующего либо в виде разрозненных зерен, либо в виде прожилков, как видно на рис. 3. Значительно реже отмечается присутствие мелкочешуйчатого мусковита, сопровождающего альбит и равномерно рассеянного по бериллу. Более интенсивное развитие мусковита совместно с берtrandитом, при очень незначительном количестве альбита, наблюдалось только в случае непосредственного контакта берилла с амблигонитом. Последний вдоль контакта замещен апатитом, а по бериллу развился комплекс упомянутых минералов, причем мусковит образует агрегаты чешуек, а берtrandит — разрозненные неправильные пластинки; количество берtrandита и мусковита приблизительно равное.

Как уже отмечено ранее, к наиболее редко встречающимся минералам, развивающимся по бериллу, кроме мусковита, принадлежат флюорит и фенацит. Флюорит был встречен дважды, причем в одном случае он, совместно с берtrandитом и очень небольшой примесью альбита, присутствовал в значительном количестве. Цвет флюорита фиолетовый, а форма зерен, как видно на рис. 4, неправильная, угловатая. В целом замещение флюоритом приурочено к трещинам в берилле, и агрегат зерен образует вытянутые цепочки.

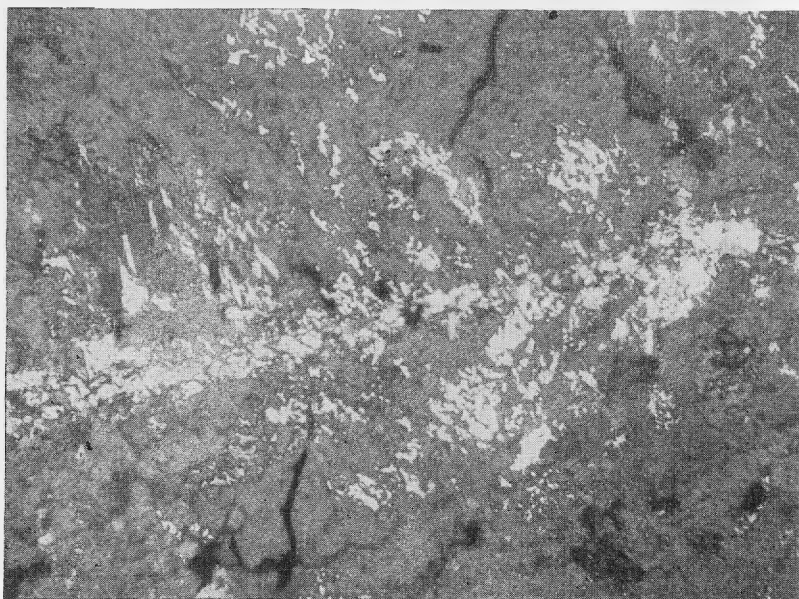


Рис. 2. Замещение берилла (темное) альбитом (светлое).
Николи \perp , увел. 70

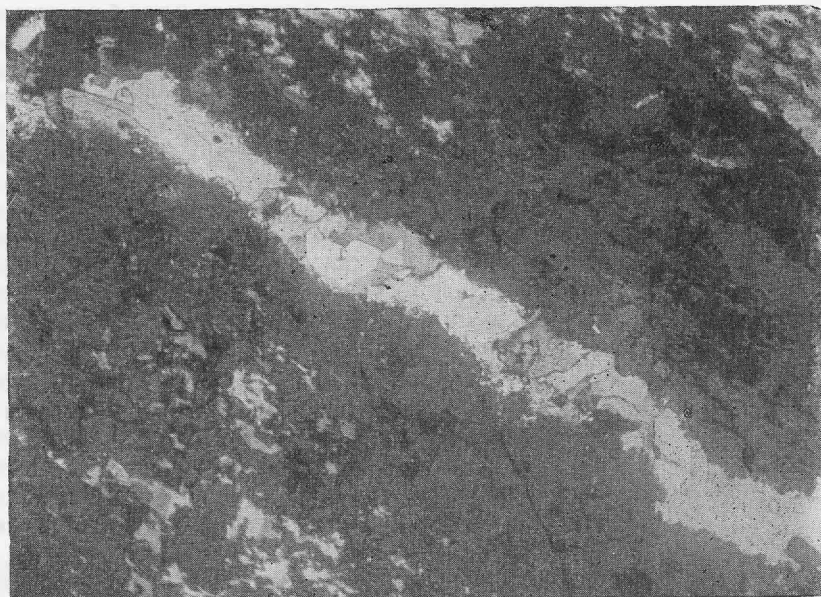


Рис. 3. Замещение берилла берtrandитом (прожилки) и альбитом
(светлые участки). Николи \perp , увел. 70

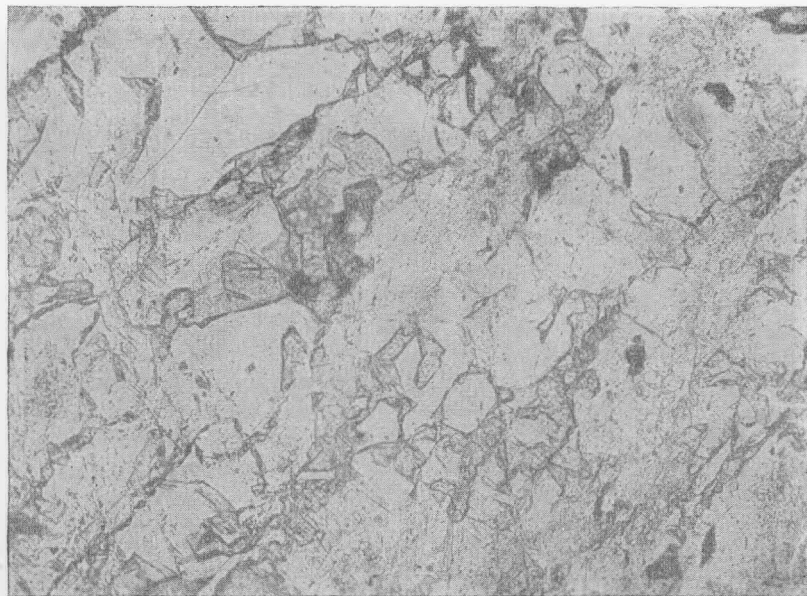


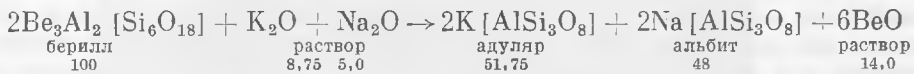
Рис. 4. Замещение берилла (светло-серое поле) флюоритом (мелкие серые участки). При одном никеле, увел. 70

В ассоциации с берtrandитом, фенакитом и калиевым полевым шпатом флюорит встречен в очень незначительном количестве. Эта редкая для данных пегматитов ассоциация вторичных минералов по бериллу обнаружена только на небольшом участке одной пегматитовой жилы, причем изменение берилла на данном участке настолько сильное, что он местами приобретает ноздреватый характер. Образование фенакита, берtrandита и калиевого полевого шпата приблизительно приурочено к трещинам спайности берилла, при этом образуется сетка грубопараллельных прожилков, от которых в разные стороны под разными углами отходят более тонкие короткие ответвления, выполненные чаще берtrandитом и, реже, калиевым полевым шпатом. В промежутках между прожилками вторичные продукты развиваются в виде кучных бесформенных скоплений. Фенакит образует в прожилках преимущественно агрегат беспорядочно ориентированных изометричных зерен, в стороны от которых, приблизительно перпендикулярно прожилкам, иногда отходят удлиненные зерна фенакита. Некоторые прожилки на значительном протяжении выполняются одним зерном фенакита. Очень редко можно наблюдать непосредственный контакт фенакита и берилла, так как обычно их разделяет калиевый полевой шпат. Берtrandит представлен агрегатом мелких пластинок, которые в большом количестве присутствуют в прожилках совместно с фенакитом, бывают включены в более крупные зерна фенакита, а также, как сказано выше, выполняют самостоятельно тонкие короткие трещинки.

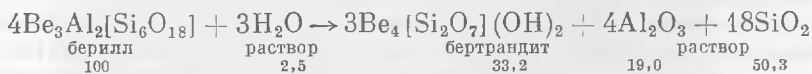
Прожилки, выполненные агрегатом фенакита, берtrandита и калиевого полевого шпата, имеют неправильные контуры, так как калиевый полевой шпат, разъедавая берилл, проникает в него в виде заливов и разветвляется. Прожилки, выполненные только берtrandитом или только калиевым полевым шпатом, характеризуются как четкими резкими, так и неправильными расплывчатыми границами с бериллом.

Флюорит, как отмечено выше, встречается редко. Он образует фиолетовые ксеноморфные зерна и ассоциирует с калиевым полевым шпатом, фенакитом и берtrandитом в бесформенных участках, занимающих промежутки между прожилками. В целом калиевый полевой шпат, берtrandит и фенакит в данном процессе изменения берилла пользуются равным количественным развитием. В литературе имеются следующие указания относительно аналогичных вторичных изменений берилла. Замещение его берtrandитом совместно со слюдообразным минералом отмечают в берилле пегматитов Закавказья Е. В. Кузнецова (1931) и в пегматитах Алтынтау С. С. Курбатов (1935). В пегматитах Ивеланда (Норвегия) Штрэнд (Strand, 1953) описал псевдоморфозы по бериллу, состоящие из берtrandита, мусковита и небольшого количества эвклаза. В пегматитах Западной Моравии Черный (Černý, 1956) отметил развитие по бериллу берtrandита совместно с бериллийсодержащим альбитом № 11. Ранее в одной из работ о пегматитах было описано развитие по бериллу берtrandита с мусковитом, берtrandита с ортоклазом и фенакитом, фенакита с ортоклазом, причем мусковит реакционен и к бериллу, и к берtrandиту, а ортоклаз — к бериллу и к фенакиту. Кроме того, там же отмечалось замещение берилла фенакитом и ортоклазом, наблюдаемое в местах интенсивного окварцевания пегматитовой жилы. Состав вторичных минералов, развивающихся по бериллу в этих пегматитах, близок к описываемому нами. Отличие состоит в отсутствии реакционных взаимоотношений между вторичными минералами. Все они развиваются одновременно или почти одновременно, но только по бериллу. Не наблюдается также окварцевания пегматита на участке, где берилл замещается калиевым полевым шпатом, фенакитом и берtrandитом.

Исходя из состава вторичных минералов, развивающихся по бериллу, можно заключить, что на него воздействовали гидротермальные растворы, содержащие калий и натрий, что способствовало появлению микроклина и альбита, образование которых не требовало никаких дополнительных окислов, но сопровождалось выносом бериллия. Реакцию эту можно выразить следующей схемой¹:



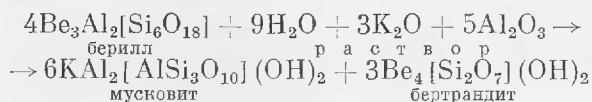
Цифры, так же как у Штрэнда (Strand, 1953), выражают проценты по отношению к исходному бериллу и в данной реакции они показывают, что количество вынесенного и количество вынесенного вещества приблизительно одинаковы. Менее интенсивно проявилось воздействие на берилл почти чистых водных растворов, сопровождавшееся образованием только берtrandита. Количество бериллия при этом процессе остается неизменным, но происходит вынос кремнезема и глинозема, которые, как видно из приведенной реакции, составляют две трети от изменяющегося берилла.



В том случае, когда водный раствор содержал калий, натрий, кальций и фтор, наряду с берtrandитом и альбитом, берилл замещался флюоритом. Однако воздействие такого раствора одновременно на амблигонит

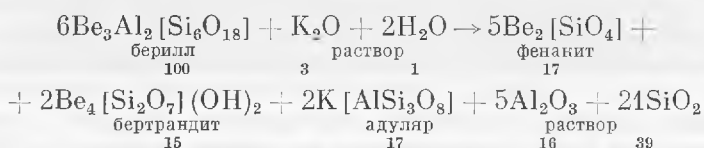
¹ Все приводимые ниже реакции представляют собой только схемы, имеющие целью яснее представить процессы и не претендующие на отражение действительных природных явлений, которые, вероятно, значительно сложнее.

и берилл вдоль их контакта привело к тому, что по амблигониту развились апатит, а освободившийся и перешедший в раствор глинозем вместе со щелочами воздействовали на берилл с образованием по нему мусковита, бертрандита и подчиненного количества альбита. Схематически образование бертрандита и мусковита можно представить в следующем виде:



Развитие же по бериллу мусковита совместно с альбитом могло протекать как согласно приведенной реакции, так и при отсутствии глинозема в растворе, и тогда имел место вынос кремнезема. В обоих случаях выносился бериллий.

Как полагает Т. И. Тимченко, замещение берилла фенакитом, бертрандитом и калиевым полевым шпатом может сопровождаться привнесом кремнезема щелочными растворами, однако оно может протекать и с выносом кремнезема и глинозема по следующей схеме ¹:



Как уже отмечено ранее, наиболее широко развитым вторичным изменением берилла в описываемых пегматитах является развитие по нему полевых шпатов. Этот процесс сопровождается освобождением бериллия, который переносится и вновь кристаллизуется в виде бериллиевых минералов. А. А. Беус (1956) высказал предположение, основанное на широком распространении в бериллах первичных включений хлоридов и фторидов щелочных металлов, флюорита и углекислоты, что бериллий в процессе формирования пегматитов переносится в виде комплексных соединений типа хлорбериллатов, фторбериллатов и карбонатбериллатов щелочных металлов, мигрирующих в форме эманаций в начальной стадии процесса и в виде водных растворов в поздний период. Б.П. Соболев и А. В. Новоселова (1959) экспериментально подтвердили возможность извлечения бериллия из инертной твердой фазы в присутствии фтористых соединений и перевод его в летучую форму, «...при этом в условиях избытка катионов щелочных металлов, характерного для природных процессов, возможной формой переноса бериллия в газовой фазе являются фторбериллаты». Указанными авторами установлено также, что при наличии в системе SiO_2 и присутствии фторбериллатов происходит переход кремния в газовую фазу и перенос его, вероятно, в виде оксифторидов.

В описываемых пегматитах ассоциация поздних бериллиевых минералов с флюоритом, альбитом и калиевым полевым шпатом позволяет предположить, что бериллий переносился в форме фторбериллатов натрия и калия. Освобожденный бериллий участвует в новообразовании минералов в пустотах, в трещинах и на плоскостях отдельности пегматитов. Часть пустот возникла по бериллу, о чем свидетельствуют реликты его, но большая часть неизвестного происхождения.

¹ При составлении схемы учитывались приблизительно равные количества вторичных минералов и сильная пористость измененного берилла, возникшая благодаря выносу значительного количества реагировавшего материала.

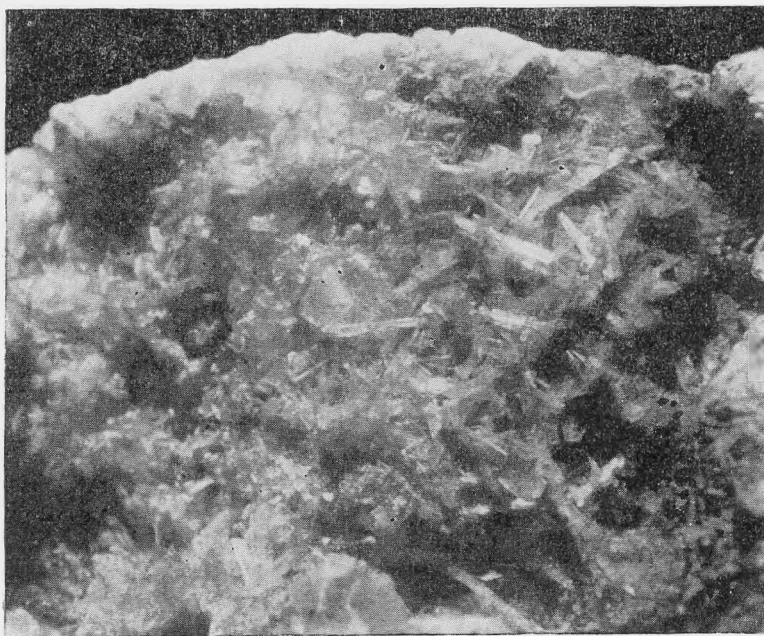


Рис. 5. Пустотка, выполненная иголочками бавенита. Увел. 9



Рис. 6. Сросток бавенита в пустотке. Увел. 5,5



Рис. 7. Радиально-лучистые сростки бавенита (светлое) на плоскости отдельности. Увел. 4

К новообразованиям бериллийсодержащих минералов относятся: главным образом широко распространенный бавенит, в меньшем количестве берtrandит и редко фенакит. Все три перечисленных минерала присутствуют в пустотах, но в трещинах и на плоскостях отдельности развивается только бавенит.

Фенакит образован гексагональной призмой и тупым ромбоэдром; он сероватого цвета, оптически положительный, $N_g = 1,670$, $N_m = 1,654$, ассоциирует с флюоритом и берtrandитом.

Берtrandит образует агрегат очень тонких по (001) пластинок, с хорошо выраженными гранями (001), (100), (010) и (110); $N_g = 1,612$, $N_m = 1,600$, $N_p = 1,588$, $(-)$ $2V = 70^\circ$; ассоциирует с флюоритом.

Бавенит в пустотах кристаллизуется в виде сильно удлинённых по оси [001] игл размером до 5 мм (рис. 5) или очень уплощённых по (010) пластинок. Последние иногда, налегая друг на друга, образуют сростки, (размером до 7 мм), подобные сложенному вееру, каждый сегмент которого имеет хорошо выраженные вертикальную штриховку и спайность, перпендикулярную удлинению. Иногда два или три веероподобных сростка бывают соединены с одного конца, создавая двух- или трехлучевые образования, как видно на рис. 6. Вместе с бавенитом в пустотах присутствуют альбит, калиевый полевой шпат, редко флюорит и очень редко берtrandит.

На плоскостях отдельности бавенит образует радиально-лучистые астровидные сростки до 5 мм в диаметре, состоящие из пластинок сильно уплощённых по (010). Вместе с бавенитом кристаллизуется ромбовидный,

замутненный большим количеством жидких включений калиевый полевой шпат, как показано на рис. 7. В трещинах бавенит имеет характер очень мелких иголочек.

Порошкограммы бавенита
(Fe — антикатод, $D = 57,3$)

Таблица

Сибирь		Урал		Сибирь		Урал	
d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I
		4,91	2			1,747	4
4,77	3	4,78	1	1,720	8	1,72	8
4,08	6	4,14	4	1,653	8	1,64	7
3,69	10	3,67	8			1,62	1
3,54	1			1,612	4	1,61	2
				1,581	1		
3,32	10	3,36	7	1,564	7	1,556	5
		3,29	10			1,550	1
3,18	8	3,20	5	1,530	1		
3,08	6	3,07	4	1,506	1		
2,99	6	2,98	4	1,478	6	1,475	2ш.
2,80	6	2,80	2	1,440	1		
		2,74	1	1,413	1		
		2,71	1	1,375	5		
		2,63	1	1,318	9	1,315	4
2,54	7	2,53	5	1,302	9		
2,46	2	2,46	2	1,282	1	1,298	3
2,40	5	2,40	3	1,250	8	1,245	3
		2,29	1	1,211	1р.		
		2,26	2	1,198	5	1,193	2
2,23	5ш.	2,226	1	1,183	7	1,176	3
2,14	2	2,205	1	1,157	8		
		2,08	4	1,132	3		
2,06	5ш.	2,05	5	1,112	5		
1,967	4	1,96	4	1,088	8		
1,922	6	1,93	3	0,077	8		
		1,91	3	1,070	5		
1,867	4	1,85	1	1,053	1		
1,815	5	1,805	3	1,045	1		
				1,038	5		
				1,023	5		
				1,012	5		

Цвет бавенита белый. Спайность совершенная в одном и хорошая в другом направлении. Под микроскопом минерал бесцветен. Погасание прямое. $N_g = 1,587$; $N_m = 1,581-1,579$; $N_p = 1,580-1,578$; (+) $2V = 10-26^\circ$, дисперсия $\rho > v$. Порошкограмма бавенита приведена в таблице, где для сравнения приведена также порошкограмма бавенита Урала.

Что касается угла оптических осей бавенита, то в литературе (Fleischer, Switzer, 1953) приведены следующие значения: 47° (Бавено, Италия), 58° (Меса Гранде, Калифорния), 60° (Урал), 22° (Лондондерри,

Австралия). Тщательные замеры угла оптических осей (по двум осям на федоровском столике) бавенита Урала дали величину 28° , бавенита Кольского полуострова $34-38^\circ$, для описываемого нами бавенита характерно колебание угла оптических осей от 10 до 26° , причем наибольший угол замерен на федоровском столике, а наименьший — с помощью окулярмикрометра.

Приводимые в литературе величины угла оптических осей бавенита, полученные путем расчета, не соответствуют действительности. Изучение Зюльковской (Ziolkowska, 1954) соотношения величины угла оптических осей и показателей преломления показало, что для небольшой величины двупреломления недостаточно трех или даже четырех десятичных знаков в числах показателей преломления для вычисления по ним угла оптических осей даже с приближенной точностью.

Присутствие бавенита в бериллсодержащих пегматитах отмечается рядом исследователей.

Шаллер и Фаерчилд (Schaller, Fairchild, 1932) описали псевдоморфозу бавенита по розовому бериллу из пегматитов Меса Гранде в штате Калифорния; замещение приурочено к внутренней части кристалла берилла, где на стенках полости бавенит образует сферолиты, покрытые щеткой уплощенных призматических кристалликов; на реликтах берилла видно, как бавенит замещает его вдоль главных трещин.

Упомянутый бавенит из пегматитов Урала развит в пустотах плагиноклазитовой части жил, реже выполняет прожилки в плагиноклазите или образует на нем корки, еще реже встречается в виде крупных округлых выделений. Спутниками бавенита являются берилл, плагиноклаз № 31, флюорит, апатит, корундофиллит, мусковит, рихидолит и калиево-натровые полевые шпаты, содержащие BeO . Образование бавенита объясняется переработкой берилла и плагиноклаза № 31-33 гидротермальными растворами; при разложении берилла часть бериллия связывается в бавенит и микроклин на месте реакции, но большая часть выносится и участвует в новообразовании этих же минералов в трещинах и пустотах берилла и плагиноклаза.

Роулидж и Хейтон (Rowledge, Hayton, 1948) отметили бавенит в пегматитах Лондондерри (Западная Австралия), где он совместно с кварцем выполняет пустотки в измененном берилле и образуется одним из последних при кристаллизации минерализованных растворов, пропитывающих пегматит.

Флейшер и Швитцер (Fleischer, Switzer, 1953) упоминают о бавените из месторождения Амелия (Виргиния, США), где он найден в небольшой пустоте в клевеландите с вкрапленными в него редкими кристаллами берtrandита.

Станек (Staněk, 1954) отмечает в пегматитах Ецлова (Чехословакия) бавенит, развивающийся в пустотках по бериллу, где с ним ассоциирует адуляр. Черный (Cerny, 1956) описывает бавенит из пегматитов близ Драгонина (Чехословакия), являющийся продуктом изменения берилла. Последний сперва замещается берtrandитом и бериллийсодержащим альбитом № 11, по которым затем развиваются бавенит и каолиноподобное вещество. Чех (Cech, 1957) описал бавенит из пегматитов Маршикова (Чехословакия), ассоциирующийся с мусковитом. Бавенит первичный и возникает в конце гидротермальной фазы; в пегматитах же около Маршикова он развивается по трещинкам в берилле. Матиас (1959) описал бавенит из пегматитов Кольского полуострова, где он присутствует в трещинах и в пустотках выщелачивания совместно с реликтами берилла. Бавенит вторичный, образующийся при разложении берилла и, воз-

можно, плагноклаза; кальций для него заимствовался из вмещающих пород.

В описываемых нами пегматитах ни микроскопически, ни при просмотре шлифов среди продуктов, непосредственно развивающихся по бериллу, не был встречен бавенит, но он широко развит в пустотах, где, как уже отмечалось, совместно с ним присутствует иногда и бертрандит. Ни разу не было встречено замещения бертрандита бавенитом и наоборот. Создается впечатление, что оба минерала кристаллизовались отдельно друг от друга, но в зависимости от состава раствора. Кальций для бавенита, по-видимому, заимствовался растворами из вмещающих пегматиты амфиболитов.

Изложенное выше свидетельствует о том, что берилл, входящий в состав пегматитов, сравнительно легко подвергается вторичным изменениям. По нему образуются как бериллиевые минералы — бертрандит и фенакит, так и небериллиевые — калиевый полевой шпат, альбит, мусковит, флюорит. Освободившийся бериллий входит в состав минералов пустот и трещин в виде бертрандита и фенакита, а при наличии в растворе ионов кальция образуется бавенит. Все эти изменения необходимо учитывать при исследовании бериллоносных пегматитов.

ЛИТЕРАТУРА

- Б е у с А. А. Геохимия бериллия. — Геохимия, № 5, 1956.
- К у з н е ц о в а Е. В. Материалы по пегматитовым жилам Дзиркульского массива в Закавказье. Изв. ВГРО, т. I, вып. 98, 1931.
- К у р б а т о в С. С. Материалы к минералогии пегматитовых жил Алтыя-Тау (I пегматитовая жила). — Труды Таджикско-Памирской экспедиции, вып. 41. Изд-во АН СССР, 1935.
- М а т н а с В. В. О находке бавенита в пегматитах Кольского полуострова. — Материалы по минералогии Кольского полуострова, т. 1, 1959.
- С о б о л с в Б. П., Н о в о с е л о в а А. В. О роли фтористых соединений в переносе бериллия и образовании фенакита. — Геохимия № 1, 1959.
- Č e s h F. Bavenit z Maršíkova. Přírodověd sbor. Ostravského kraje, 18, čís. 2, 1957.
- Č e r n y P. Bavenit a sdružené nerosty z Drahonína. Časop. mineral. a geol. 1, čís 2, 1956.
- F l e i s c h e M., S w i t z e r G. The bavenit problem. Amer. Mineralogist, 38, № 11—12 1953; Геохимия, минералогия и месторож. бериллия. Сборн. переводов № 3, 1955 г.
- R o w l e d g e H. P., H a y t o n J. G. Two new beryllium minerals from Londonderry. J. Roy. Soc. Western. Austral., 33, 1948.
- S c h a l l e r W. T., F a i r c h i l d J. Bavenite, a beryllium mineral, pseudomorphous after beryl, from California. Amer. Mineralogist, 17, № 9, 1932.
- Š t a n ě k J. Sopedumen a bavenit z Jeclova. Časop. Moravského mus. Brně. Vědy přírod., 39, 1954.
- Š t r a n d T. Euclse from Iveland, occuring as an alteration product of beryl. Norsk. geol. tidsskr. 31, s. 1, 1953.
- Z í o l k o w s k a B. Zależność kata osi optycznych w kryształach od spólczynników zalamania. Arch. mineral., 18, zes. 1, 1954.