

УДК 549.742

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ГРУППЫ БЕРБАНКИТА

Ю.В.Беловицкая

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва
mineral@geol.msu.ru

И.В.Пеков

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва
yuku@newmail.ru

Группа бербанкита объединяет шесть минеральных видов с общей формулой $A_3B_3(CO_3)_5$, где $A = Na > Ca, REE^{3+}, \square$; $B = Sr, Ca, Ba, REE^{3+}, Na$: бербанкит, ханнешит, кальциобербанкит, ремондит-(Ce), ремондит-(La) и петерсенит-(Ce). Структурный тип бербанкита ($P6_3mc$) исключительно устойчив к вариациям состава: ханнешит, кальциобербанкит, гексагональный аналог ремондита и бербанкит изоструктурны и формируют систему непрерывных твердых растворов. Все составы (94 анализа) минералов группы бербанкита описываются в рамках изоморфной системы с крайними членами: $(Na_2Ca)M^{2+}_3(CO_3)_5$ и $Na_3(REE_2Na)(CO_3)_5$, где $M^{2+} = Sr, Ba, Ca$. Выделяются три генетических типа бербанкитовой минерализации: 1) в карбонатитах, где образуются минералы «максимально усредненного» состава, с повышенными содержаниями Ba и Ca; 2) в щелочных гидротермалитах, где диапазон составов бербанкитоподобных фаз предельно широк; 3) в пектолитовых метасоматитах, где бербанкит, сильно обеднен REE. В карбонатитах минералы группы бербанкита являются ранними высокотемпературными образованиями, а в нефелин-сиенитовых массивах формируются на гидротермальных стадиях при низких температурах, что связано с различным режимом углекислоты. При понижении щелочности минералы группы бербанкита замещаются целой серией вторичных минералов, среди которых преобладают бесщелочные карбонаты REE, Sr, Ba и Ca. В статье 5 таблиц, 3 рисунка, список литературы из 50 названий.

Группа бербанкита объединяет шесть минеральных видов с общей формулой $A_3B_3(CO_3)_5$, где $A = Na > Ca, REE^{3+}, \square$; $B = Sr, Ca, Ba, REE^{3+}, Na$: бербанкит $(Na, Ca, \square)_3(Sr, REE, Ba, Ca)_3(CO_3)_5$, ханнешит $(Na, Ca)_3(Ba, Sr, REE, Ca)_3(CO_3)_5$, кальциобербанкит $(Na, Ca, REE)_3(Ca, REE, Sr)_3(CO_3)_5$, ремондит-(Ce) $Na_3(Ce, Ca, Na, Sr)_3(CO_3)_5$, ремондит-(La) $Na_3(La, Ce, Ca)_3(CO_3)_5$ и петерсенит-(Ce) $(Na, Ca)_4(Ce, La, Sr)_2(CO_3)_5$. Три первых минерала имеют гексагональную симметрию ($P6_3mc$), а три последних — псевдогексагональные моноклинные ($P2_1, \gamma = 119.8 - 120.5^\circ$).

В структурах гексагональных членов группы выделяются две независимых катионных позиции — A (Na и Ca) и B (REE, Sr, Ba и Ca), и три типа карбонатных групп разной ориентации. Десятивершинники B , соединенные с CO_3 -группами по вершинам, образуют слои из шестичленных колец, параллельных (001). Восьмивершинники A формируют бесконечные зигзагообразные колонки, в которых соседние полиэдры контактируют по граням (Воронков, Шумяцкая, 1968; Effenberger *et al.*, 1985; Беловицкая и др., 2000, 2001, 2002). Структура ремондита близка к бербанкитовой (Ginderow, 1989), а в петерсените два из шести B -полиэдров упорядоченно заселяются Na, что приводит к удвоению параметра a (Grice *et al.*, 1994).

Карбонаты группы бербанкита формируют шестиугольные призматические кристаллы, но чаще встречаются в виде неправильных зерен и их агрегатов. Они прозрачны,

без спайности, обладают стекляннм до жирного блеском и светлыми окрасками: желтой, зеленой, бледно-коричневой, розовой; обычные бесцветные и белые, реже встречаются красные, оранжевые, серые разновидности.

Бербанкит — распространенный минерал, другие члены группы редки. В одном из типов «редкоземельных карбонатитов» (Хибинь, Vuoriaarvi, Горное Озеро и др.) бербанкит и продукты его изменения образуют гигантские скопления, являясь главным потенциально промышленным компонентом, легкообогащаемой комплексной рудой REE, Sr, Ba.

Несмотря на полувековую историю изучения, значительное число публикаций и обширную географию находок, обобщающие работы по минералам группы бербанкита отсутствуют. Мы попытались систематизировать литературные материалы и, дополнив их сопоставимым объемом новых данных, показать связь состава и структурных особенностей членов группы с условиями их формирования. Нами исследованы 32 образца из восьми щелочных комплексов — Хибинского, Ловозерского (Кольский п-ов), Vuoriaarvi (Сев. Карелия), Вишневогорского (Ю. Урал), Горноозерского, Мурунского (В. Сибирь), Сент-Илера (Квебек) и Ханнешина (Афганистан).

Катионный состав минералов (табл. 1-3) изучен электроннозондовым методом. Все анализы, включая литературные, рассчитаны на сумму зарядов, равную 10.00 — эквивалент $(CO_3)_5$. Позиция B заполнялась до 3.00 формульных единиц (ф.е.) атомами Sr,

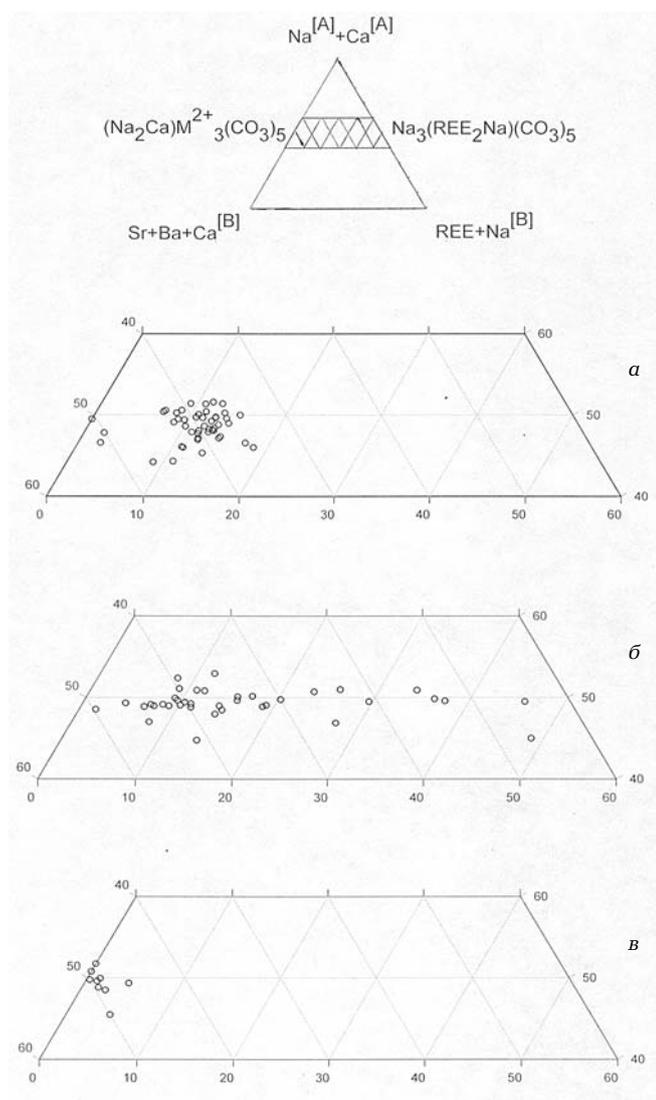


РИС. 1. Соотношения катионов в минералах группы бербанкита: а) из карбонатитов, б) из щелочных гидротермалитов, в) из пектолитовых метасоматитов

Ba, REE, Th, K, а при их недостатке добавлялся Ca, затем Na. После этого оставшиеся Na и Ca помещались в позицию А. Если сумма А-катионов оказывалась меньше 3.00, то недостающая величина приписывалась вакансии, согласно структурным данным (Effenberger *et al.*, 1985; Беловицкая и др., 2000). Для старых анализов, где REE определялись в виде суммы, при расчете условно взята атомная масса Ce. Катионный состав минералов группы бербанкита широко варьирует (рис. 1, 2). В А-позициях всегда преобладает Na (1.3-3 ф.е.), но количество Ca подчас тоже существенно: до 1.25 ф.е. Более разнообразен состав катионов в полиэдрах В, где могут доминировать Sr, Ba, Ce, La и Ca.

Порошковые рентгенографические исследования проведены нами для 11 образцов (табл. 4), в том числе уточнены с помощью полнопрофильного анализа по методу Ритвельда структура пяти образцов с разным составом: 1) бербанкита, обедненного REE (ан. 92), порошкограмма которого содержит хорошо разрешенные дублеты; 2) бербанкита «типичного» состава (ан. 64) с нерасщепленными рефлексами; 3) ханнешита (ан. 21); 4) кальциобербанкита (ан. 12); 5) минерала с составом ремондита-(Ce) (ан. 79), но по порошкограмме идентичного представителям структурного типа бербанкита.

Члены группы образуют сложную изоморфную систему, крайними членами которой

Таблица 1. Химический состав минералов группы бербанкита из карбонатитов (продолжение)

Компо-ненты	Бербанкит						
	Афри-канда	Кальк-фель-г	Шаси-ондон	Чипмен Лейк			
	ан. 41	ан. 42	ан. 43	ан. 44	ан. 45	ан. 46	ан. 47
	Мас. %						
Na ₂ O	7.47	10.6	13.1	6.03	7.38	7.20	6.70
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-
CaO	8.24	3.6	5.5	14.52	21.09	15.01	13.53
SrO	16.82	25.6	26.7	29.49	29.12	30.44	28.63
BaO	20.17	5.5	5.2	4.88	4.06	1.85	3.37
ΣREE ₂ O ₃	н.о.	н.о.	н.о.	12.53	н.о.	н.о.	н.о.
Y ₂ O ₃	-	-	-	н.о.	0.47	0.71	0.45
La ₂ O ₃	6.10	7.0	6.2	-"	0.76	0.54	4.34
Ce ₂ O ₃	5.92	9.0	8.8	-"	1.20	0.77	5.80
Pr ₂ O ₃	0.93	-	-	-"	0.18	0.15	0.60
Nd ₂ O ₃	0.70	1.5	2.1	-"	0.21	0.26	1.64
Sm ₂ O ₃	-	-	-	-"	0.15	0.07	0.00
(CO ₂)	н.о.	(29.8)	(33.3)	32.58	н.о.	н.о.	н.о.
Сумма	66.35	92.6	100.9	100.03	65.06*	60.54*	65.19*
	Формульные коэффициенты						
Na ^[A]	1.76	2.51	2.79	1.24	1.43	1.62	1.37
Ca ^[A]	0.82	0.35	0.26	1.14	1.22	1.13	1.02
Σ[A]	2.57	2.86	3.05	2.38	2.62	2.75	2.39
K ^[B]	-	-	-	-	-	-	-
Ca ^[B]	0.25	0.13	0.39	0.51	1.03	0.75	0.52
Sr ^[B]	1.18	1.82	1.70	1.81	1.68	2.05	1.75
Ba ^[B]	0.96	0.26	0.22	0.20	0.16	0.08	0.14
ΣM ²⁺ [B]	2.39	2.21	2.31	2.52	2.87	2.88	2.41
Y ^[B]	-	-	-	н.о.	0.03	0.04	0.02
La ^[B]	0.27	0.32	0.25	-"	0.03	0.02	0.17
Ce ^[B]	0.26	0.40	0.36	-"	0.04	0.04	0.22
Pr ^[B]	0.04	-	-	-"	0.01	0.01	0.02
Nd ^[B]	0.03	0.07	0.08	-"	0.01	0.01	0.16
Sm ^[B]	-	-	-	-"	0.01	-	-
ΣREE ^[B]	0.61	0.79	0.69	0.48	0.13	0.12	0.59
Σ[B]	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
(CO ₃)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

Примечание.

1, 2 – обр. №№ 65111 и 65105 соответственно, из колл. Минералогического музея им. А.Е.Ферсмана РАН; 3, 4 (Бородин, Капустин, 1962); 5-7, 10 – обр. из колл. В.В. Субботина; 8, 9 (Субботин и др., 1999); 11 (Кухаренко и др., 1965); 12, 13 (Субботин и др., 1999); 14 – обр. № 65503 из колл. Минералогического музея им. А.Е.Ферсмана РАН; 15 (Здодрик, 1966); 16 – обр. из колл. А.П. Хомякова (Пеков и др., 1998); 17, 18 – обр. 81605 из колл. Минералогического музея им. А.Е.Ферсмана РАН (Пеков и др., 1998); 19, 20 (Еременко, Велько, 1982); 21, 22 (Пеков и др., 1998); 24 (Тихоненкова, 1974); 25 (Тихоненкова и др., 1977); 26 (Минералогия., 1978); 27 (Дудкин и др., 1981); 28 (Зайцев и др., 1990); 29, 30 (Зайцев и др., 1997); 31, 32 (Zaitsev et al., 1998); 33 (Жабин и др., 1971); 34 (Пожарицкая, Самойлов, 1972); 35, 36 (Иванюк и др., 2002); 37-40 (Zaitsev, Chakhmouradian, 2002); 41 (Zaitsev, Chakhmouradian, 2002); 42, 43 (Buhn et al., 1999); 44 (Shi Li, Tong Wang, 1993); 45-47 (Platt, Woolley, 1990); №№ 1, 2, 5-7, 10, 14, 23 – данные настоящей работы. * – В сумму анализа также входят (мас. %): 3 – 0.35 MgO, 1.05 Al₂O₃, 0.48 Fe₂O₃, 0.19 SiO₂, 0.97 H₂O; 4 – 0.10 Fe₂O₃, 0.06 SiO₂, 2.60 H₂O; 11 – 0.03 Al₂O₃, 0.22 Fe₂O₃, 0.10 SiO₂, 0.25 H₂O; 15 – 0.14 MgO, 0.41 Al₂O₃, 0.24 Fe₂O₃, 0.16 SiO₂, 0.023 H₂O, 0.03 F; 19 – 1.59 H₂O; 20 – 1.32 H₂O; 25 – 0.93 Fe₂O₃; 26 – 0.10 MgO, 0.20 Al₂O₃, 0.10 Fe₂O₃, 0.22 SiO₂, 1.37 H₂O; 28 – 0.02 MgO, 0.07 MnO, 0.44 FeO, 0.20 SiO₂, 0.85 H₂O, 0.04 F, 0.02 -O=F; 32 – 0.16 ThO₂, 0.20 Gd₂O₃ (0.01 ф.е.); 33 – 0.05 MnO, 0.37 Fe₂O₃, 1.76 H₂O, 0.20 F, 0.08 -O=F; 34 – 0.93 Al₂O₃, 0.23 Fe₂O₃, 1.81 H₂O; 36 – 0.12 TiO₂; 45 – 0.25 FeO, 0.15 MnO, 0.04 MgO; 46 – 0.53 FeO, 0.13 MnO, 2.88 MgO; 47 – 0.13 FeO. н.о. – компонент не определялся, прочерк – количество компонента ниже предела обнаружения. ** – Описан как «бербанкит», но по составу отвечает кальциобербанкиту.

являются безредкоземельные фазы (Na₂Ca) M²⁺₃(CO₃)₅, где M²⁺ = Sr, Ba, Ca, и петерсенит Na₃(REE₂Na)(CO₃)₅ – без двухвалентных катионов. Все составы попадают в интервал между этими точками, образуя протяженное поле – рис. 1 и 2а,б. Существенных разрывов смесимости в данной системе не установлено, несмотря на два структурных перехода: от гексагональных членов к моноклинному ремондиту и далее к петерсениту. Эти переходы относятся ко 2-му роду, т.е. осуществляются плавно, без разрыва химических связей.

Условия нахождения и образования

Обобщая имеющийся материал, можно выделить три главных генетических типа бербанкитовой минерализации. Все они связаны с массивами щелочных пород. Наибольшие концентрации бербанкита приурочены к карбонатитам; этот тип и изучен лучше других. В щелочных гидротермалитах наблюдаются самые широкие вариации состава и, соответственно, наибольшее видовое разнообразие при сравнительно скромных масштабах минерализации. Нами выделен третий генетический тип – скопления низкредкоземельного бербанкита, связанные со специфическими пектолитовыми метасоматитами Хибинского и Мурунского массивов. В каждом случае минералы характеризуются индивидуальными особенностями катионных соотношений (рис. 1, табл. 1 – 3). Бербанкит из содоносной осадочной формации Грин-Ривер (США) находится в ассоциации с большинством тех же минералов, что и в карбонатитах и щелочных гидротермалитах (Fitzpatrick, Pabst, 1977), и скорее всего имеет низкотемпературное гидротермальное происхождение.

В табл. 5 кратко охарактеризованы местонахождения минералов группы бербанкита, для которых известен химический состав. Они сгруппированы по генетическим типам. Проявления, связанные с вмещающими карбонатитами породами, а также с продуктами гидротермальной деятельности в карбонатитах, условно отнесены к карбонатитовому типу. Находки, сделанные в поздних парагенезисах пегматитов нефелин-сиенитовых комплексов, отнесены к щелочным гидротермалитам.

Итак, минералы группы бербанкита формируются в щелочно-карбонатных системах, связанных с объектами разных типов. Температурный диапазон, в котором осуществляется их кристаллизация, весьма широк.

В карбонатитах целого ряда массивов эти минералы является главными концентраторами Sr, Ba и REE. Здесь бербанкит и его анало-

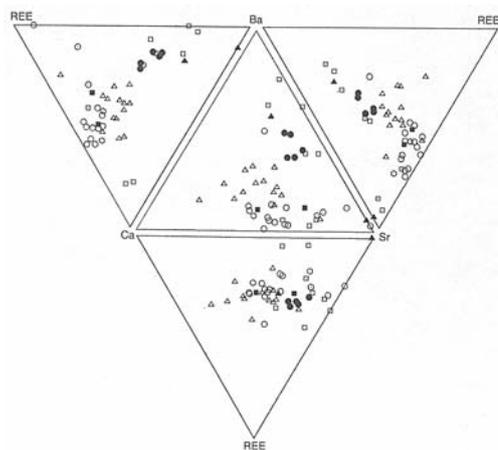


РИС. 2а. Соотношения Sr, Ca, Ba, REE в позиции В минералов группы бербанкита из карбонатов: ● — Африканда, ○ — Арбарастах, △ — Вуориярви, ■ — Горное Озеро, ⊙ — Калькфельд, ▲ — Ковдор, △ — Средняя Зима, □ — Ханнешин, ○ — Хибинь, ⊠ — Чипмен Лейк, ⊕ — Шасионгон

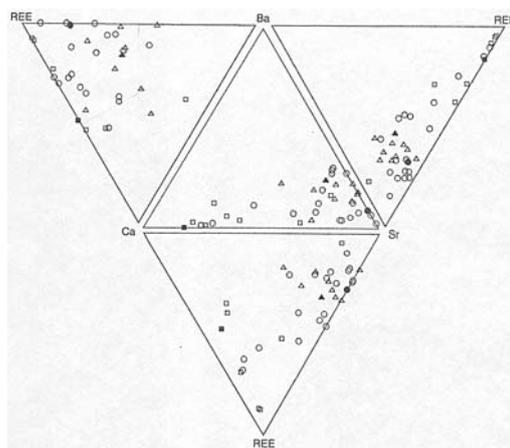


РИС. 2б. Соотношения Sr, Ca, Ba, REE в позиции В минералов группы бербанкита из щелочных гидротермалитов: ○ — Вишневые горы, ● — Покрово-Киреевское, △ — Ловозеро, ▲ — хребет Москаль, ⊠ — Роки-Бой, □ — Сент-Илер, ○ — Хибинь, ■ — Эбунджа

ги возникает на ранних стадиях карбонатитообразования при высоких температурах (не ниже 500°C), о чем свидетельствуют признаки их совместного роста с основными минералами карбонатитовой массы, присутствие в первичных включениях и замещение продуктами более поздних гидротермальных стадий.

В щелочных гидротермалитах члены группы бербанкита — поздние минералы, возникающие при существенно более низких температурах. Часто наблюдаются их кристаллы в полостях, в парагенезисах с целолитами, водными содовыми минералами. Температуры образования этих ассоциаций можно оценить как 100–250°C.

Различия во времени кристаллизации связаны в первую очередь с разным режимом углекислоты. В карбонатитообразующих системах она присутствует в избытке, и уже на ранних стадиях при достаточной активности Na появляются бербанкит и его аналоги. В массивах нефелиновых сиенитов, с которыми в основном связаны бербанкитсодержащие гидротермалиты, повышение потенциала CO₂ и, соответственно, развитие карбонатной минерализации происходит в основном на заключительном этапе эволюции.

Типохимизм и структурный типоморфизм

Широкие вариации катионного состава делают минералы группы бербанкита очень информативными в генетическом отношении.

В системе с крайними членами (Na₂Ca)M²⁺₃(CO₃)₅ и Na₃(REE₂Na)(CO₃)₅ (рис. 1) образцы из карбонатитов занимают промежуточ-

ное положение, составляя компактное поле. В позиции В этих минералов как правило преобладает Sr, реже Ca или Ba (рис. 2а), и лишь в одном образце из Вуориярви отмечено доминирование REE. Для карбонатитовых комплексов характерны фазы «максимально усредненного» состава, зачастую с сопоставимыми количествами Sr (обычно 0.7-1.5 ф.е.), Ba (в среднем 0.4-1.0 ф.е.), Ca (в позиции В как правило 0.3-1.0 ф.е.) и REE (обычно 0.5-0.8 ф.е.). Именно в карбонатитах зафиксированы самые высокие содержания Ba для минералов этой группы, и только здесь известен ханнешит (Ханнешин, Хибинь, Африканда, Ковдор). В позиции А обычно присутствует 0.3-0.7 ф.е. Ca (табл. 1). «Усредненный» состав минералов из раннекарбонатитовых ассоциаций (рис. 1) и высокое содержание Ba — самого крупного катиона (рис. 2а) объясняются высокотемпературными условиями кристаллизации. Сильное обогащение, как и значительное обеднение каким-либо катионом нехарактерно для карбонатитовых образцов. Соотношения REE в бербанкитоподобных фазах из карбонатитов достаточно стабильны и в целом типичны для большинства других минералов щелочных пород: Ce > La >> Nd. Для членов группы бербанкита из карбонатитов характерен рост содержания Sr от ранних генераций к поздним: в Хибинах бербанкитом сменяется ханнешит (Пеков и др., 1998), в Вуориярви — кальциобербанкит (Субботин и др., 1999), в поздней ассоциации в Ковдоре найден высокостронциевый бербанкит (Иванюк и др., 2002).

В щелочных гидротермалитах известны все члены группы, кроме ханнешита. Диапа-

Таблица 3. Химический состав бербанкита из пектолитовых метасоматитов и осадочной формации Грин-Ривер

Компо- нент ы	Пектолитовые метасоматиты									Грин-Ри вер
	Мурун					Хибинны				
	ан. 85	ан. 86	ан. 87	ан. 88	ан. 89	ан. 90	ан. 91	ан. 92	ан. 93	
Мас. %										
Na ₂ O	9.83	5.64	8.44	8.04	9.92	8.84	8.51	8.29	9.72	10.47
K ₂ O	-	-	1.06	0.82	-	-	-	-	-	-
CaO	12.30	10.27	12.04	13.59	11.22	7.85	10.04	10.32	8.59	8.00
SrO	42.18	32.00	34.60	33.10	37.88	26.10	36.28	36.94	34.00	15.61
BaO	2.72	13.38	1.79	1.83	10.21	21.05	9.91	6.61	6.83	5.73
Y ₂ O ₃	0.33	-	-	-	-	-	0.48	0.49	-	0.19
La ₂ O ₃	-	3.04	-	-	1.58	1.16	1.32	2.06	3.58	3.73
Ce ₂ O ₃	-	2.90	-	-	0.33	0.40	0.44	0.90	2.65	8.65
Pr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.57
Nd ₂ O ₃	-	0.02	-	-	-	0.34	-	-	0.17	4.60
Sm ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.55
CO ₂	н.о.	31.08	30.86	29.19	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	(29.73)
Сумма	67.36	98.31	90.94*	93.71*	71.14	65.73	66.98	65.59	65.54	88.83
Формульные коэффициенты										
Na ^[A]	1.96	1.26	1.92	1.82	1.98	2.07	1.82	1.78	2.11	2.50
Ca ^[A]	1.01	1.25	1.12	1.15	0.98	0.92	1.04	1.04	0.81	0.32
Σ[A]	2.97	2.50	3.04	2.97	2.95	2.99	2.86	2.82	2.92	2.82
K ^[B]	-	-	0.16	0.12	-	-	-	-	-	-
Ca ^[B]	0.35	0.02	0.40	0.55	0.26	0.09	0.15	0.19	0.22	0.75
Sr ^[B]	2.52	2.13	2.36	2.24	2.26	1.83	2.32	2.37	2.21	1.11
Ba ^[B]	0.11	0.60	0.08	0.08	0.41	1.00	0.43	0.29	0.30	0.28
ΣM ^{2+ [B]}	2.98	2.75	2.84	2.88	2.93	2.92	2.90	2.85	2.73	2.14
Y ^[B]	0.02	-	-	-	-	-	0.03	0.03	-	0.01
La ^[B]	-	0.13	-	-	0.06	0.05	0.05	0.08	0.15	0.17
Ce ^[B]	-	0.12	-	-	0.01	0.02	0.02	0.04	0.11	0.39
Pr ^[B]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07
Nd ^[B]	-	-	-	-	-	0.01	-	-	0.01	0.20
Sm ^[B]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02
ΣREE ^[B]	0.02	0.25	-	-	0.07	0.08	0.10	0.15	0.27	0.86
Σ[B]	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
(CO ₃)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

Примечание.

85 – обр. № 82976 из колл. Минералогического музея им. А.Е.Ферсмана РАН; 86-88 (Конев и др., 1996); 92 (Беловицкая и др., 2000); 93 (Яковенчук и др., 1999); 94 (Fitzpatrick, Pabst, 1977); 85, 89-91 – данные настоящей работы.
* – В сумму анализа также входят (мас. %): 87 – 0.01 MgO, 0.01 MnO, 0.05 TiO₂, 0.08 H₂O, 0.10 F; 88 – 0.04 MgO, 0.02 MnO, 0.08 TiO₂, 0.01 H₂O, 0.05 F.

Таблица 4. Симметрия и параметры элементарной ячейки минералов группы бербанкита

	Пр. гр.	a, Å	b, Å	c, Å	γ, град.	V, Å ³	c/a	Источник
Бербанкит, обедненный REE								
ан. 85	<i>R6₃mc</i>	10.525(1)	10.525(1)	6.492(1)	120	619.64(1)	0.6168	Данные авторов
ан. 92	<i>R6₃mc</i>	10.5263(1)	10.5263(1)	6.5392(1)	120	627.49(1)	0.6212	Беловицкая и др., 2000
Бербанкит								
ан. 2	<i>R6₃mc</i>	10.494(1)	10.494(1)	6.498(1)	120	622.82(1)	0.6192	Данные авторов
ан. 23	<i>R6₃mc</i>	10.458(1)	10.458(1)	6.381(3)	120	604(1)	0.6102	Данные авторов
ан. 64	<i>R6₃mc</i>	10.5313(1)	10.5313(1)	6.4829(1)	120	622.68(1)	0.6156	Беловицкая и др., 2000
ан. 65	<i>R6₃mc</i>	10.516(2)	10.516(2)	6.482(4)	120	620(1)	0.6164	Данные авторов
ан. 66	<i>R6₃mc</i>	10.54(1)	10.54(1)	6.48(1)	120	623(1)	0.615	Данные авторов
без химического анализа	<i>R6₃mc</i>	10.52(4)	10.52(4)	6.51(2)	120	624(2)	0.619	Воронков, Шумяцкая, 1968
ан. 81	<i>R6₃mc</i>	10.512(2)	10.512(2)	6.492(2)	120	621.3	0.6176	Effenberger <i>et al.</i> , 1985
Кальциобербанкит								
ан. 12	<i>R6₃mc</i>	10.4974(1)	10.4974(1)	6.4309(1)	120	613.72(1)	0.6126	Беловицкая и др., 2001
Ханнешит								
ан. 21	<i>R6₃mc</i>	10.5790(1)	10.5790(1)	6.5446(1)	120	634.31(1)	0.6186	Беловицкая и др., 2002
Гексагональный аналог ремондита								
ан. 79	<i>R6₃mc</i>	10.4889(1)	10.4889(1)	6.3869(1)	120	608.53(6)	0.6089	Гобечия и др., 2001
Ремондит-(Ce)								
ан. 84	<i>P2₁</i>	10.412(4)	10.414(4)	6.291(3)	119.80(5)	591.9	0.6042	Ginderow, 1989
Ремондит-(La)								
ан. 71	<i>P2₁</i>	10.49(1)	10.50(1)	6.417(4)	119.80(1)	613(1)	0.6117	Пеков и др., 2000
Петерсенит-(Ce)								
ан. 76	<i>P2₁</i>	20.872(4)	10.601(2)	6.367(1)	120.50(1)*	1213.9(4)	0.6006**	Grice <i>et al.</i> , 1994

Примечание.

Номера анализов соответствуют табл. 1-3. * – В оригинале b и c поменяны местами; ** – c/b.

Таблица 5. Проявления и условия нахождения минералов группы бербанкита

Проявление	Минералы	Условия нахождения и типичные спутники	Источники
ПРОЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С КАРБОНАТИТАМИ			
Вуориярви, С.Карелия	Бербанкит Кальциобербанкит Ремондит-(Ce)	Кальцитовые карбонаты: пирротин, флогопит, баритокальцит, норсетит, эвальдит, доннейит, фатерит, стронцианит, олекминскит, анкилит, пиррохлор, франконит; доломитовые карбонаты: кальцит, сидерит, анкилит, барит, амфибол, хлорит, серпентин, сульфиды	Бородин, Капустин, 1962; Кухаренко и др., 1965; Субботин и др., 1999; н.д.
Горное Озеро, В.Сибирь	Бербанкит	Амфибол- и эгирин-доломитовые, амфибол-кальци- товые и анкеритовые карбонаты	Здорик, 1966
Ханнешин, Афганистан	Ханнешит Бербанкит	Гидротермально измененные вулканические доло- митовые и доломит-анкеритовые карбонаты: ба- рит, калкинсит, карбоцернаит, маккельвиит, хлорит	Еременко, Велько, 1982; Пеков и др., 1998
Хибины, Кольский п-ов	Бербанкит Ханнешит Кальциобербанкит	Кальцитовые карбонаты: биотит, апатит, карбо- цернаит, флюорит, сульфиды, давсонит	Кирнарский, Козырева, 1974; Минералогия..., 1978; Зайцев и др., 1990, 1997; Пеков и др., 1998; н.д.
Арбарастах, Якутия	Бербанкит	Доломит-анкеритовые карбонаты: витерит, стро- нцианит, бастнезит, хуанхит, магнетит, сфалерит, галенит; кальцитовые карбонаты: флюорит	Жабин и др., 1971
Средняя Зима, Сибирь	Кальциобербанкит	Кальцитовые карбонаты: анкерит	Пожарицкая, Самойлов, 1972
Ковдор, Кольский п-ов	Бербанкит Ханнешит	Полости доломитовых карбонатов: бахчисарайце- вит (для бербанкита) Кальцит-шортитовые карбона- ты: флогопит, бонштедтит (для ханнешита)	Иванюк и др., 2002
Африканда, Кольский п-ов	Бербанкит Ханнешит	Кальцит-амфибол-клинопироксеновая порода: вклю- чения в апатите	Zaitsev, Chakhmou- radian, 2002
Калькфельд, Намибия	Бербанкит	Включения в кварце из кварцитов, вмещающих кар- бонаты: нахколит, галит, сильвин, флюорит, каль- цит, криолит, сульфиды, фосфаты	Buhn <i>et al.</i> , 1999
Чипмен Лейк, Онтарио, Канада	Бербанкит	Доломитовые карбонаты: апатит, магнетит, суль- фиды, пиррохлор, барит, монацит, кальцит, магнетит, сидерит, норсетит, стронцианит, REE-фторкарбона- ты, альбит, ортоклаз	Platt, Wooley, 1990
ПРОЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЩЕЛОЧНЫМИ ГИДРОТЕРМАЛИТАМИ			
Вишневые горы, Ю.Урал	Бербанкит	Трещины в миаскитах: микроклин, альбит, хлорит, мусковит, ильменорутит, кальцит, сидерит, строн- цианит, анкилит, доннейит, ненадкевичит, короби- цинит франконит	Пеков и др., 1996
Ловозеро, Кольский п-ов	Бербанкит	Ультращелочные пегматиты: КПШ, эгирин, сидо- ренкит, нахколит, шортит, катаплеитом, когаркоит, нейборит, беловит; микроклиновые жилы контакто- вой зоны	Тихоненкова, Казакова, 1964; Хомяков, 1990; Пеков, 2001
Хибины, Кольский п-ов	Бербанкит Ремондит-(Ce) Ремондит-(La) Петерсенит-(Ce)	Ультращелочные пегматиты: микроклин, эгирин, со- далит, биотит, натролит, пектолит, канкрисилит, ви- лиоцит, шортит, пирссонит, трона, бонштедтит, ви- ноградовит, лампрофиллит, расвумит, макинавит, ви- тусит-(Ce), накафит, ломоносовит, сазыкинаит-(Y); эгириновые и полевошпат-флюоритовые прожилки	Шлюкова и др., 1972; Тихоненкова и др., 1977; Хомяков, 1990; Пеков и др., 1998, 2000; Яковенчук и др., 1999; Беловицкая и др., 2000; н.д.
Сент-Илер, Квебек, Канада	Бербанкит Кальциобербанкит Ремондит-(Ce) Петерсенит-(Ce)	Высокощелочные пегматиты: микроклин, альбит, эгирин, анальдим, натролит, хлорит, апатит, родо- хрозит, биотит, катаплеит, эпидимит, эвдиалит, серандит, шомикит-(Y), рутил, криолит, сидерит, сабинаит. Ксенолиты мраморов: кальцит, флюорит, лейкофан, нарсарсуцит, шайрерит, шортит, термо- натрит; миаролы в нефелиновых сиенитах	Chen, Chao, 1974; Horvath, Gault, 1990; Grice <i>et al.</i> , 1994; Van Velthuisen <i>et al.</i> , 1995; Horvath, Pfenninger- Horvath, 2000; н.д.
Роки-Бой, Монтана, США	Бербанкит	Кальцитовые прожилки: эгирин, барит, калкинсит, лантанит, анкилит, сульфиды	Ресога, Kerr, 1953
Хр. Москаль, Ю.Урал	Бербанкит	Содалит-анальдим-канкринитовые прожилки в ще- лочных метасоматитах: нейборит	Ефимов и др., 1969
Покрово-Кире- евское, Украина	Бербанкит	Гидротермалиты нефелиновых сиенитов: кальцит, флюорит, натролит	Литвин и др., 1998

Таблица 5. Проявления и условия нахождения минералов группы бербанкита (продолжение)

Проявление	Минералы	Условия нахождения и типичные спутники	Источники
Эбунджа, Камерун	Ремондит-(Се) Бербанкит	Прожилки в нефелиновых сиенитах: кальцит, эгирин	Cesbron <i>et al.</i> , 1988
Грин Ривер, Юта и Вайоминг, США	Бербанкит	Гидротермально переработанные содоносные осадки: нахколит, трона, маккельвиит	Fitzpatrick, Pabst, 1977
ПРОЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПЕКТОЛИТОВЫМИ МЕТАСОМАТИТАМИ			
Мурун, В.Сибирь	Бербанкит	Жилы в микроклинитах и фенитах: пектолит, чароит, магнезиоарфведсонит	Конев и др., 1996; н.д.
Хибины, Кольский п-ов	Бербанкит	Линзы и жилы в ийолит-уртитях: пектолит, флюорит, биотит, сфалерит, галенит	Н.д.
Примечание: н.д. — наши данные			

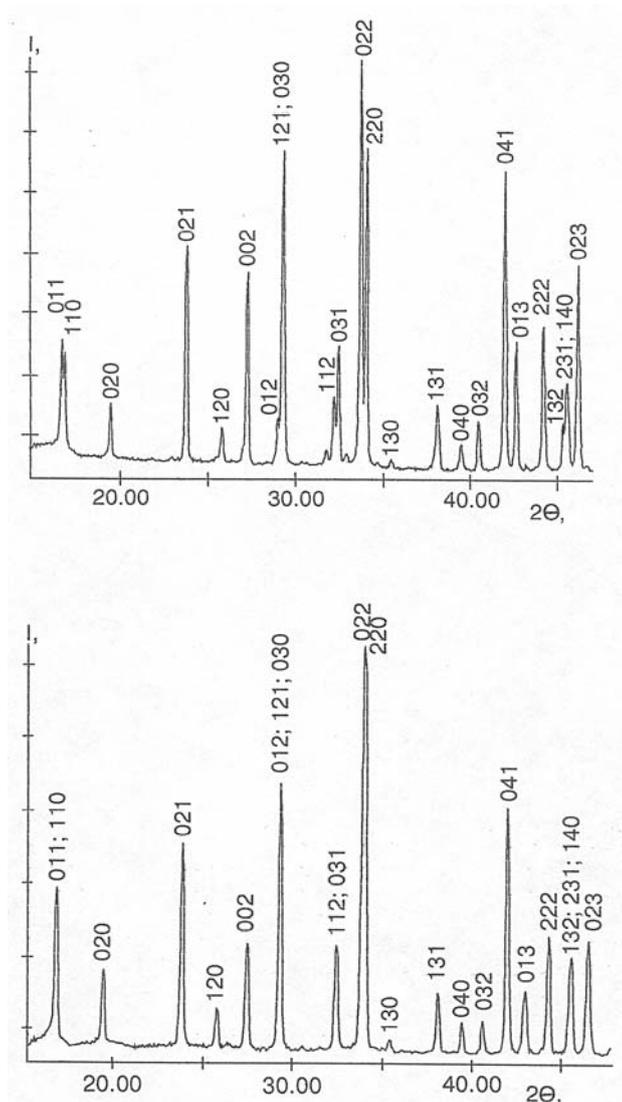
зон их составов здесь предельно широк (рис. 1) — от сильно обедненного REE бербанкита (ан. 73) до петерсенита. В бербанките из щелочных гидротермалитов практически всех объектов наблюдается существенное преобладание Sr (обычно 1.6-2.3 ф.е.) над другими *V*-катионами (рис. 2б). Для этого генетического типа нехарактерно высокое содержание Ва в бербанкитоподобных фазах — крайне редко более 0.6 ф.е. Это объясняется тем, что с понижением температуры усиливается тенденция очень крупного Va^{2+} к обособлению, и он образует собственные фазы практически без Sr: цеолиты, ВаТi-силикаты, ВаREE-фторкарбонаты и др. В щелочных гидротермалитах сделаны практически все находки высоконатриевых членов группы бербанкита. Здесь достигаются максимальные содержания Na, что, видимо, и является необходимым условием для возникновения ремондита и петерсенита. Представители группы бербанкита в щелочных гидротермалитах характеризуются повышенной ролью La и малой — Nd в спектре REE.

Бербанкит из пектолитовых метасоматитов по составу приближается к крайнему безредкоземельному члену: $(Na_2Ca)M^{2+}_3(CO_3)_5$ (рис. 1). При этом он сильно обогащен Sr (обычно 2.1-2.5 ф.е. — табл. 3). Все образцы, как хибинские, так и мурунские, характеризуются преобладанием La над Се при незначительных содержаниях Pr и Nd.

Наиболее широкая среди всех членов группы распространенность бербанкита, образующего очень крупные скопления, свидетельствует о максимальной устойчивости данного структурного типа именно при преобладании Sr в *V*-позиции. Подтверждением этого служат и резко обогащенные Sr составы бербанкита из щелочных гидротермалитов: здесь при кристаллизации из водных растворов в достаточно низкотемпературных условиях наилучшим образом осуществляется фракционирование близких по свойствам химических элементов и максимально реализу-

ется сходство различных структурных типов к определенным компонентам. Обусловленное кристаллохимическими причинами отделение Sr от намного более распространенного Ca в высокощелочных гидротермальных системах ярко демонстрируется устойчивым парагенезисом высокостронциевого бербанкита с шортитом $Na_2Ca_2(CO_3)_3$, почти не содержащим Sr. Для бербанкитоподобных фаз из низкотемпературных образований более характерно нахождение Ca в *A*-, нежели в *V*-позиции, т.е. предпочтительнее оказывается его изоморфизм с Na, а не с Sr. Вероятно, относительная редкость Ca-, Ва- и REE-доминантных членов группы бербанкита в гидротермалитах связана с тем, что при низких температурах они могут кристаллизоваться лишь в условиях дефицита Sr, что в целом нетипично для щелочных комплексов.

Редкоземельные элементы в бербанките входят в десятивершинные полиэдры, где доминирует крупный ион Sr^{2+} с радиусом 1.32 Å (Shannon, Prewitt, 1969). Закономерно, что обычно в спектре REE бербанкитоподобных фаз преобладает самый распространенный в природе Ce^{3+} (радиус 1.26 Å). Однако, La^{3+} (1.28 Å) — наиболее крупный из REE^{3+} — ближе по размеру к Sr^{2+} , что и обуславливает присутствие его в значительном количестве. С понижением температуры степень фракционирования REE растет, и это приводит к увеличению роли La, которая оказывается тем более значительна, чем больше Sr содержит минерал. Наглядный пример — соотношения лантаноидов в бербанките из различных образований Хибинского массива. Богатый стронцием минерал из относительно низкотемпературных дифференциатов (гидротермалиты г. Кукисвумчорр и метасоматиты г. Ньюоркпахк) резко обогащен и лантаном (до 85% от суммы REE), тогда как высокотемпературный бербанкит «усредненного» состава из карбонатитов Хибин имеет состав, типичный и для минерала из



а

б

РИС. 3. Фрагменты рентгенодифракционных спектров ($\lambda\text{CuK}\alpha$) берберита: а) берберит, обедненный REE (ан. 92), из пектолитовых метасоматитов г.Ньюрклах, Хибины; б) берберит «типичного» состава (ан. 64) из щелочных гидротермалитов г.Кукивумчорр, Хибины

Других карбонатитовых объектов: Се — 45-50, La — 35-45, Nd — 5-10% от YREE.

Порошковые рентгенограммы гексагональных берберитоподобных минералов разбиваются на две группы. В первую попадают порошкограммы образцов из карбонатитов и щелочных гидротермалитов, в другую — берберита с низким содержанием REE из пектолитовых метасоматитов. В последних большинство рефлексов расщеплено (рис. 3). Наиболее сильно это расщепление проявлено у отражений в областях $2.74\text{-}2.77 \text{ \AA}$ (hkl 112, 301) и $2.62\text{-}2.65 \text{ \AA}$ (hkl 202, 220): берберит из карбонатитов и щелочных гидротермалитов дает одиночные пики, а из пектолитовых ме-

тасоматитов — четко разрешенные дублеты (рис. 3). Это вкуче с устойчивостью величины отношения Na:Ca » 2:1 в позиции А обедненного REE берберита породило предположение об упорядочении в нем А-катионов. Однако, оно не подтвердилось: все изученные образцы оказались изоструктурными, с пр. гр. $R\bar{6}_3mc$ и неупорядоченным размещением Na и Ca в позиции А (Беловицкая и др., 2000, 2001, 2002; Гобечия и др., 2001). Причина расщепления рефлексов — только соотношение параметров элементарной ячейки. Для берберита, обедненного REE, $c/a = 0.621$, а в берберите «типичного» состава $c/a = 0.615$ (табл. 4). С уменьшением этой величины происходит

сближение величин межплоскостных расстояний во многих парах отражений. Так, для пар (112)-(301) и (202)-(220) полное совпадение должно произойти при $c/a = 0.61237$.

Особо отметим обнаружение ранее неизвестной гексагональной модификации ремондита-(Ce), установленной в образце из Сент-Илера (Гобечия и др., 2001).

Таким образом, структурный тип бербанкита очень устойчив. Он сохраняется в широком интервале катионных соотношений: от крайнего безредкоземельного члена $(\text{Na}_2\text{Ca})(\text{Sr,Ca,Ba})_3(\text{CO}_3)_5$ как минимум до состава $\text{Na}_{2.6}(\text{REE}_{1.5}\text{Sr}_{0.9}\text{Ca}_{0.5}\text{Na}_{0.1})_{\text{e}3.0}(\text{CO}_3)_5$, которому отвечает гексагональный аналог ремондита. Представители этого высокосимметричного структурного типа могут кристаллизоваться в большом диапазоне условий и в природе резко преобладают над моноклинными членами группы, которые типоморфны для низкотемпературных щелочных гидротермалитов и весьма редки.

Вторичные изменения

Минералы группы бербанкита становятся неустойчивыми при понижении щелочности и легко изменяются, замещаясь целой гаммой вторичных продуктов. В составе псевдоморфоз по бербанкиту известно почти два десятка (!) минералов REE, Sr, Ba и Ca, в первую очередь бесщелочных карбонатов. Наиболее часто изменению подвергаются бербанкит и его аналоги из раннекарбонатитовых парагенезисов. Их замещение происходит на гидротермальных стадиях.

В карбонатитах Вуориярви бербанкит обычно замещается агрегатами барита, стронцианита и анкилита, или же карбоцернаитом. Реже здесь встречаются частичные псевдоморфозы по бербанкиту лантанита, арагонита и целестина, а иногда калкинсита, барита, стронцианита и пирита (Капустин, 1971). При доломитизации кальцитовых карбонатитов Вуориярви по кальциобербанкиту и бербанкиту развиваются смеси кальцита, анкилита-(Ce), олекминскита, стронцианита и барита; реже в продуктах замещения присутствуют карбоцернаит, витерит, альстонит, кухаренкоит-(Ce), Се-эвальдит, Nd-маккельвиит (Субботин и др., 1999). В Горноозерском массиве в эгирин-доломитовых карбонатитах за счет бербанкита развиваются карбоцернаит или анкилит, а в анкеритовых карбонатитах он нацело изменен в агрегаты стронцианита (70-80%), бастнезита (20-30%), кальцита, барита, алланита (Здорик, 1966). В карбонатитах Хибин бербанкит замещается, иногда полностью, анкилитом-(Ce), синхизитом-(Ce), стронциани-

том и баритом (Zaitsev *et al.*, 1998). В Ханнешине отмечено развитие по ханнешиту барита (Еременко, Велько, 1982) и маккельвиита (Пекков и др., 1998). В гидротермально измененных карбонатитах Себлявра (Кольский п-ов) некогда обильный бербанкит нацело замещен анкилитом-(Ce) (данные Н.В.Сорохтиной).

В щелочных гидротермалитах процессы изменения минералов группы бербанкита проявлены намного слабее. В Роки-Бой по бербанкиту развивается калкинсит (Ресога, Кетт, 1953). В Сент-Илере ремондит-(Ce) и птерсенит-(Ce) на самых поздних гидротермальных стадиях замещаются бесщелочными карбонатами REE – синхизитом-(Ce), кальциоанкилитом-(Ce), бастнезитом-(Ce) (Horvath, Pfenninger-Horvath, 2000; наши данные). На Кировском руднике в Хибинах наблюдается развитие анкилита-(Ce) по бербанкиту. Возможно, протоминералом ячеистых анкилитовых псевдоморфоз по шестиугольным призмам не установленного минерала, широко распространенным в гидротермально измененных хибинских пегматитах, был именно бербанкит.

Основные выводы

По результатам изучения кристаллических структур всех гексагональных членов группы (Беловицкая и др., 2000, 2001, 2002; Гобечия и др., 2001) установлено, что структурный тип бербанкита ($P6_3/mc$) исключительно устойчив к вариациям состава катионов в десятивершинных *B*-полиэдрах: все эти минералы изоструктурны и формируют систему непрерывных твердых растворов. Судя по относительной распространенности этих минералов в природе и по парагенезисам, данная структура максимально устойчива при преобладании Sr в *B*-позиции.

Все составы минералов группы бербанкита описываются в рамках изоморфной системы с крайними членами: $(\text{Na}_2\text{Ca})\text{M}^{2+}_3(\text{CO}_3)_5$ и $\text{Na}_3(\text{REE}_2\text{Na})(\text{CO}_3)_5$, где $\text{M}^{2+} = \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Ca}$. Выделяются три группы составов, которые соответствуют трем генетическим типам бербанкитовой минерализации, связанным со щелочными породами. Первый из них приурочен к карбонатитам, где образуются минералы «максимально усредненного» состава, с повышенными содержаниями Ba и Ca. Здесь встречаются промышленные скопления бербанкита. Второй тип развит в щелочных гидротермалитах, где диапазон составов бербанкитоподобных фаз предельно широк. Третий тип связан с пектолитовыми метасоматитами Хибинского и Мурунского массивов, где в значительных количествах присутствует бербанкит, сильно

обедненный REE. В карбонатах минералы группы бербанкита за редким исключением являются ранними высокотемпературными образованиями, а в апатитовых массивах, наоборот, формируются на поздних стадиях при низких температурах, что связано с различным режимом углекислоты.

При понижении щелочности минералы группы бербанкита становятся неустойчивыми и легко замещаются в гидротермальных условиях целой серией вторичных минералов, среди которых преобладают бесщелочные карбонаты REE, Sr, Ba и Ca.

Благодарности

Авторы благодарны Ю.К.Кабалову, Е.Р.Гобечия, Ю.Шнайдеру, Н.Н.Кононковой, Н.Н.Коротчаевой, И.М.Куликовой и Н.В.Чуканову за помощь в проведении исследований, С.Н.Ненашевой за обсуждение статьи, А.П.Хомякову, А.С.Подлесному, В.В.Субботину, С.Н.Никандрову и сотрудникам Минералогического музея им. А.Е.Ферсмана РАН за предоставленные образцы. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (03-05-64054) и Ведущей научной школы (НШ-1087-2003-5).

Литература

- Беловицкая Ю.В., Пеков И.В., Гобечия Е.Р., Кабалов Ю.К., Субботин В.В. Кристаллическая структура кальциобербанкита; особенности структурного типа бербанкита // Кристаллография. **2001**. Т. 46. № 6. С. 1009-1013.
- Беловицкая Ю.В., Пеков И.В., Гобечия Е.Р., Кабалов Ю.К., Шнайдер Ю. Определение кристаллической структуры ханнешита методом Ритвельда // Кристаллография. **2002**. Т. 47. № 1. С. 46-49.
- Беловицкая Ю.В., Пеков И.В., Кабалов Ю.К. Уточнение кристаллических структур низкоредкоземельного и «типичного» бербанкитов методом Ритвельда // Кристаллография. **2000**. № 1. С. 32-35.
- Бородин А.С., Капустин Ю.Л. Бербанкит — первая находка в СССР // ДАН СССР. **1962**. Т. 147. № 2. С. 462-465.
- Воронков А.А., Шумяцкая Н.Г. Рентгенографическое исследование структуры бербанкита $(\text{Na}, \text{Ca})_3(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{TR})_3(\text{CO}_3)_5$ // Кристаллография. **1968**. Т. 13. № 2. С. 246-252.
- Воронков А.А., Шумяцкая Н.Г., Пятенко Ю.А. О кристаллической структуре бербанкита // Кристаллография. **1967**. Т. 12. № 1. С. 135.
- Гобечия Е.Р., Кабалов Ю.К., Беловицкая Ю.В., Пеков И.В. Кристаллическая структура гексагонального аналога ремондита // Годичная научная сессия ВМО. Традиционные и новые направления минералогических исследований в новом тысячелетии. Москва. **2001**. 13-14 декабря. С. 49-50.
- Дугкин О.Б., Полежаева Л.И., Минаков Ф.В. Карбонаты хибинских карбонатитов // В кн.: Вещественный состав щелочных интрузивных комплексов Кольского полуострова. Апатиты. Изд. КФАН СССР. **1981**. С. 78-81.
- Еременко Г.К., Велько В.А. Ханнешит $(\text{Na}, \text{Ca})_3(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{TR}, \text{Ca})_3(\text{CO}_3)_5$ — новый минерал группы бербанкита // ЗВМО. **1982**. Т. 111. В. 1. С. 321-324.
- Ефимов А.Ф., Еськова Е.М., Катаева Э.Т. О находке бербанкита в щелочных метасоматитах Урала // Тр. Мин. музея РАН. **1969**. В. 19. С. 165-169.
- Жабин А.Г., Шумяцкая Н.Г., Самсонова Н.С. Бербанкит из карбонатитового комплекса Арбарастах (Якутия) // Тр. мин. музея РАН. **1971**. В. 20. С. 202-204.
- Зайцев А.Н., Белл К., Уолл Ф., Ле Ба М. Дж. Щелочно-редкоземельные карбонаты из карбонатитов Хибинского массива: минералогия и генезис // Доклады РАН. **1997**. Т. 355. № 2. С. 241-245.
- Зайцев А.Н., Меньшиков Ю.П., Полежаева Л.И., Латышева Л.Г. Минералы Ba, Sr и TR поздних карбонатитов Хибинского щелочного массива // В кн.: Новое в минералогии Карело-Кольского региона. Петрозаводск. Изд. КНЦ АН СССР. **1990**. С. 76-89.
- Згорик Т.Б. Бербанкит и продукты его изменения // Тр. мин. музея РАН. **1966**. В. 17. С. 60-75.
- Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Ковдор. Апатиты. **2002**. 320 с.
- Капустин Ю.Л. Минералогия карбонатитов. М. **1971**. 288 с.
- Кирнарский Ю.М., Козырева Л.В. О карбонатных жилах в породах Хибинского щелочного массива // В кн.: Минералы и парагенезисы минералов магматических и метасоматических горных пород. Л. **1974**. С. 64-72.
- Конев А.А., Воробьев Е.И., Лазебник К.А. Минералогия Мурунского щелочного массива. Новосибирск. **1996**. 222 с.
- Кухаренко А.А., Орлова М.П., Багдасаров Э.А., Булах А.Г. и др. Каледонский комплекс ультраосновных щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М. **1965**. 768 с.
- Литвин А.Л., Егорова Л.Н., Кульчицкая А.А., Мельников В.С., Шаркин О.П. Богатый стронцием бербанкит из нефелиновых сиенитов Приазовья // Минералогический журнал. **1998**. Т. 20. № 2. С. 12-18.
- Минералогия Хибинского массива. М. **1978**. Т. 2. 585 с.

- Пеков И.В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М. **2001**. 464 с.
- Пеков И.В., Куликова И.М., Никаноров С.Н. О составе редкоземельных карбонатов из гидротермалитов Вишневогорского щелочного комплекса // *Материалы Уральской летней минералогической школы-96*. Екатеринбург. **1996**. С. 137-141
- Пеков И.В., Чуканов Н.В., Беловицкая Ю.В. Ханеншит и петерсенит-(Ce) из Хибин // *ЗВМО*. **1998**. № 2. С. 92-100.
- Пеков И.В., Чуканов Н.В., Кононкова Н.Н., Задов А.Е., Беловицкая Ю.В. Ремондит-(La), Na₃(La,Ce,Ca)₃(CO₃)₅ – новый минерал семейства бербанкита из Хибинского массива, Кольский полуостров // *ЗВМО*. **2000**. № 1. С. 53-60.
- Пожарицкая Л.К., Самойлов В.С. Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири. М. **1972**. 268 с.
- Субботин В.В., Волошин А.В., Пахомовский Я.А., Бахчисарайцев А.Ю. Кальциобурбанкит и бурбанкит из карбонатитового массива Вуориярви (новые данные) // *ЗВМО*. **1999**. № 1. С. 78-87.
- Тихоненкова Р.П. Sr-бербанкит из Хибинского массива // В кн.: Новые данные по минералогии и геохимии редких элементов. М. **1974**. С. 89-92.
- Тихоненкова Р.П., Казакова М.Е. Первая находка бербанкита в массиве нефелиновых сиенитов // В кн.: Минералогия и генетические особенности щелочных массивов. М. **1964**. С. 40-44.
- Тихоненкова Р.П., Шумяцкая Н.Г., Казакова М.Е. О стронциевом бербанките и группе бербанкита // В кн.: Новые данные по минералогии и минералогическим методам исследования. М. **1977**. С. 3-11.
- Хомяков А.П. Минералогия ультраапатитовых щелочных пород. М. **1990**. 196 с.
- Шлюкова З.В., Казакова М.Е., Власова Е.В. Первая находка бербанкита в Хибинском массиве // В кн.: Авторефераты работы сотрудников ИГЕМ АН СССР за 1971 г. М. **1972**. С. 77.
- Яковенчук В.Н. Минералогия и условия образования карбонатов в гидротермальных жилах Кукисвумчорского месторождения (Хибинский массив). Дисс. к.г.-м.н. Апатиты. **1995**. 189 с.
- Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.М., Меньшиков Ю.П. Минералы Хибинского массива. М. **1999**. 326 с.
- Vũ hn B., Rankin A.H., Radtke M., Haller M., Knöchel A. Burbankite, a (Sr,REE,Na,Ca)-carbonate in fluid inclusions from carbonatite-derived fluids: Identification and characterization using Laser Raman spectroscopy, SEM-EDX, and synchrotron micro-XRF analysis // *Amer. Miner.* **1999**. V. 84. P. 1117-1125.
- Cesbron F., Gilles C., Pelisson P., Saugues J.-C. La remondite-(Ce), un nouveau carbonate de terres rares de la famille de la burbankite // *C.R. Acad. Sci. Paris*. **1988**. V. 307. № 8. P. 915-920.
- Chen T.T., Chao G.Y. Burbankite from Mont St. Hilaire, Quebec // *Canad. Miner.* **1974**. V. 12. Pt. 5. P. 342-345.
- Effenberger H., Kluger F., Paulus H., Wolfel E.R. Crystal structure refinement of burbankite // *N. Jb. Miner. Mh.* **1985**. H. 4. S. 161-170.
- Fitzpatrick J., Pabst A. Burbankite from the Green River Formation, Wyoming // *Amer. Miner.* **1977**. V. 62. № 1-2. P. 158-163.
- Ginderow P.D. Structure de Na₃M₃(CO₃)₅ (M = Terre Rare, Ca, Na, Sr), rattache a la burbankite // *Acta Crist.* **1989**. C. 45. P. 187-191.
- Grice J.D., Van Velthuisen J., Gault R.A. Peterseinit-(Ce), a new mineral from Mont Saint-Hilaire, and its structural relationship to other REE carbonates // *Canad. Miner.* **1994**. V. 32. P. 405-414.
- Horvath L., Gault R.A. The Mineralogy of Mont Saint-Hilaire, Quebec // *Min. Record*. **1990**. V. 21. № 4. 284-368 p.
- Horvath L., Pfenninger-Horvath E. I minerali di Mont Saint-Hilaire (Quebec, Canada) // *Rivista Mineralogica Italiana*. **2000**. № 3. P. 140-202.
- Pecora W.T., Kerr J.H. Burbankite and calkinites, two new carbonate minerals from Montana // *Amer. Miner.* **1953**. V. 38. Pt. 11-12. P. 1169-1183.
- Platt R.G., Woolley A.R. The carbonatites and fenites of Chipman Lake, Ontario // *Canad. Miner.* **1990**. V. 28. P. 241-250.
- Shannon R.D., Prewitt C.T. Effective ionic radii in oxides and fluorides // *Acta Cryst.* **1969**. C. 25. P. 925-945.
- Shi Li, Tong Wang. Origin of burbankite in biotite-aegirine carbonatite from Hubei, China. Rare Earth Minerals: chemistry, origin and ore deposits // *Mineralogical Society Spring Meeting, Natural History Museum, London, UK, Conference Extended Abstracts*. **1993**. P. 72.
- Van Velthuisen J., Gault R.A., Grice J.D. Calcicoburbankite, Na₃(Ca, REE, Sr)₃(CO₃)₅, a new mineral species from Mont Saint-Hilaire, Quebec, and its relationship to the burbankite group of minerals // *Canad. Miner.* **1995**. V. 33. P. 1231-1235.
- Zaitsev A.N., Chakhmouradian A.R. Calcite-amphibole-clinopyroxene rock from the Afrikanda Complex, Kola Peninsula, Russia: Mineralogy and a possible link to carbonatites. II. Oxysalt minerals // *Canad. Miner.* **2002**. V. 40. P. 103-120.
- Zaitsev A.N., Wall F., Le Bas M.J. REE-Sr-Ba minerals from the Khibina carbonatites, Kola Peninsula, Russia: their mineralogy, paragenesis and evolution // *Miner. Mag.*