

Hutcheon I., Gunter A. E., Lecheminant A. N. Serendibite from Penrhum Group marble, Malville Peninsular District of Franklin // Can. Miner. 1977. Vol. 15. N 1. P. 108—112.

Nicollet C. Occurrences of grandidierite, serendibite and tourmaline near Ihosy, Southern Madagascar // Miner. Mag. 1990. Vol. 54. N 1. P. 131—133.

Olesch M., Seifert F. Stability and phase relations of trioctahedral calcium brittle micas (clintonite group) // J. Petrol. 1976. Vol. 17. N 3. P. 291—314.

Институт земной коры СО РАН  
Иркутск

Поступила в редакцию  
30 мая 1994 г.

УДК 549.753.1

© ЗВМО, № 2, 1995 г.

Proc. RMS, № 2, 1995

Д. чл. И. В. ПЕКОВ, Н. В. ЧУКАНОВ, О. В. ЕЛЕЦКАЯ,  
д. чл. А. П. ХОМЯКОВ, д. чл. Ю. П. МЕНЬШИКОВ

## БЕЛОВИТ-(СЕ): НОВЫЕ ДАННЫЕ, УТОЧНЕННАЯ ФОРМУЛА И СООТНОШЕНИЕ С ДРУГИМИ МИНЕРАЛАМИ ГРУППЫ АПАТИТА

I. V. PEKOV, N. V. CHUKANOV, O. V. ELETSKAYA, A. P. KHOMYAKOV, YU. P. MENSHIKOV.  
BELOVITE-(CE): THE NEW DATA, REFINED FORMULA, ITS RELATIONSHIP WITH OTHER  
MINERALS OF THE APATITE GROUP.

The representative collection (9 specimens) of belovite-(Ce) from Lovozero and Khibiny complexes, including the holotype specimen of this mineral, has been studied together, for comparison, with strontium-apatite and apatite samples. Belovite-(Ce) has the stable stoichiometry Sr:Na:REE roughly equal 3:1:1. In additional anion F > OH ratio is established in all specimens. X-ray diagram and IR-spectrum of belovite-(Ce) have some distinctive features which substantiate the ordered distribution of cations in the mineral structure and thus allow to identify it clearly. The specified formula of belovite-(Ce) is  $\text{Na}(\text{Ce}, \text{La})\text{Sr}_3[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{OH})$ . Combined accumulation of Sr, REE and Na as admixtures in apatite can lead to forming in it of the belovite-like structure clusters, which have been discovered in the REE-Sr-apatite variety («saamite»).

Беловит-(Се) — натриево-редкоземельно-стронциевый фосфат из группы апатита — открыт 40 лет назад (Бородин, Казакова, 1954), но до сих пор в отношении него в различных изданиях, включая солидные справочники, существует немало разногласий. Наибольшие расхождения присутствуют в вопросе о химической формуле минерала. Дело осложняется тем, что зачастую беловит-(Се) путают с другим членом этой группы — стронциоапатитом. Одна из главных задач данной работы — внести ясность в вопрос о химической формуле беловита-(Се) и о соотношении его с другими стронцийсодержащими минералами группы апатита. Авторами исследована представительная коллекция, включающая 9 образцов беловита-(Се) из 8 пегматитовых тел Ловозерского и Хибинского массивов, в том числе и голотип минерала — образец с г. Малый Пункаруайв, переданный Л. С. Бородиным в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве. В качестве сравнительного материала использованы природный достаточно чистый фторапатит (Слюдянка, Прибайкалье), REE-Sr-содержащие разновидности апатита (Ловозеро и Хибинь), природный стронциоапатит (Хибинь), синтетический  $\text{Sr}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$  со структурой апатита.

История изучения. Беловит-(Се) был впервые установлен Л. С. Бородиным в уссингитовом теле горы Малый Пункаруайв в Ловозерском щелочном массиве (Бородин, Казакова, 1954). Работы последующих лет показали, что этот фосфат — характерный аксессуар ультраапатитовых пегматитов Ловозера (Семенов, 1972; Буссен и др., 1978; Хомяков, 1990). Недавно он был обнаружен и в соседнем Хибинском массиве.

В настоящее время опубликовано три химических анализа беловита-(Се) (Бородин, Казакова, 1954; Семенов, 1962; Буссен и др., 1978) — табл. 1. Пер-

воначально формула минерала была предложена в следующем виде:  $(\text{Sr}, \text{Ce}, \text{Na}, \text{Ca})_{10}[\text{P}_6\text{O}_{24}][\text{OH}, \text{O}]_2$  (Бородин, Казакова, 1954). Е. И. Семенов (1962) отметил кратные атомные соотношения катионов в беловите:  $\text{Sr}:\text{Na}:\text{REE} \approx 3:1:1$ , и предположил их упорядоченное расположение. Это было подтверждено структурной расшифровкой на материале с г. М. Пункаруайв (Клевцова, Борисов, 1964), а позднее — и более точным определением кристаллической структуры беловита с г. Карнасурт (Надежина и др., 1987). В структуре апатита катионы занимают позиции двух типов: девятивершинники, «наннзанные» на ось третьего порядка, и семивершинники, образующие колонки вокруг оси  $b_3$ . В структуре беловита в семивершинных полиэдрах ( $A_{II}$ ) преимущественно локализуется  $\text{Sr}^{2+}$ , а единая четырехкратная позиция внутри девятивершинных построек распадается на две двухкратные, одну из которых ( $A_I$ ) занимают в основном атомы  $\text{Na}^+$ , а другую ( $A_I'$ ) — преимущественно  $\text{REE}^{3+}$ .  $A_I$ - и  $A_I'$ -катионы расположены в структуре беловита послойно на уровнях  $z \sim 0$  и  $z \sim 0.5$  соответственно. Такое распределение катионов по трем кристаллографически независимым позициям приводит к снижению симметрии от  $P6_3/m$  у апатита до  $P3$  у беловита; формула последнего приобретает вид:  $\text{NaCeSr}_3\text{P}_3\text{O}_{12}\text{OH}$  (Надежина и др., 1987).

Р. Мийаваки (Miyawaki, Nakai, 1993) и Э. Никел (Nickel, Nichols, 1991) также придерживаются этой записи формулы —  $\text{NaSr}_3\text{Ce}[\text{PO}_4]_3\text{OH}$ . Для образца из пегматитовой залежи «Юбилейная» было отмечено небольшое преобладание фтора над гидроксидом (1.33 % F и 1.30 %  $\text{H}_2\text{O}$ ) и предложен другой вариант формулы, с доминированием фтора в позиции дополнительного аниона (Буссен и др., 1978; Хомяков, 1990).

Открытие в щелочных пегматитах массива Инагли (Ю. Якутия) стронцио-apatита  $(\text{Sr}, \text{Ca})_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{OH})$  (Ефимов и др., 1962) также способствовало возникновению некоторой путаницы. Например, в картотеке рентгеновских стандартов JCPDS в карточке 31-1350 приводится: «беловит  $\text{Sr}_3(\text{Ce}, \text{Na}, \text{Ca})_2[\text{PO}_4]_3\text{OH}$ , массив Инагли, Якутия», т. е. порошкограмма стронциоапатита присвоена беловиту.

Условия нахождения. Изученные авторами образцы происходят из пегматитов различного состава. Кратко охарактеризуем их.

1. Г. Малый Пункаруайв, Ловозеро. Образец № 56440 из Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана РАН. Передан в музей Л. С. Бородиным 4 марта 1954 г. Является голотипным образцом беловита-(Ce). Представляет собой свежий полупрозрачный призматический кристалл, исштрихованный вдоль [100], размером  $18 \times 5$  мм. Кристалл находится в сиреневом уссингите в ассоциации с натролитом, сфалеритом, эгирином и бурыми псевдоморфозами оксидов Mn по серандиту. Пегматитовое тело подробно описано Е. И. Семеновым (1972).

2. Г. Малый Пункаруайв, тот же пегматит. Призматический кристалл  $6 \times 2$  мм желтовато-зеленого цвета в светло-сиреневом уссингите. С одного конца и по трещинам частично замещен желтым охристым веществом, вероятно агрегатом рабдофана и анкилита. Образец предоставлен Н. И. Фришманом.

3. Г. Карнасурт, Ловозеро. Мелкие (1—2 мм) вытянутые зерна желтого цвета в натролите из прожилка мощностью 1—5 см, секущего луавриты и фойяиты. С беловитом-(Ce) ассоциируют гидроксиканкринит, стенструпин-(Ce), вуоннемит, маунтинит, настрофит, ильмайокиит.

4. Г. Кедыкверпахк, Ловозеро. Хорошо образованные ярко-желтые прозрачные кристаллы до  $15 \times 1.5$  мм, ограненные гексагональной призмой и базопинакоидом. Находятся в сливном бесцветном натролите, слагающем прожилок мощностью до 15 см, секущий фойяиты. Также присутствуют витусит-(Ce), канкрисилит, вуоннемит, эгирин, манганнептунит, сфалерит, виллиомит и др.

5. Г. Аллуайв, Ловозеро. Крупное линзовидное пегматитовое тело «Шкатулка» мощностью > 2 м. Светло-зеленые призматические расщепленные кристаллы до  $7 \times 1$  мм со штриховкой вдоль [100]. Беловит-(Ce) наблюдается на грани-

Таблица 1

Химический состав (мас. %) и оптические свойства беловита-(Ce)

Chemical composition (% wt) and optical properties of belovite-(Ce)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Na <sub>2</sub> O	4.85	4.32	3.91	3.91	4.14	4.14	3.78	3.59	4.65	3.60	4.08	2.12	4.23
CaO	0.66	0.70	0.42	0.78	0.23	0.54	0.49	0.76	1.02	5.23	0.75	2.40	—
SrO	38.71	36.07	40.26	38.95	41.50	41.61	42.31	44.24	39.57	33.60	39.31	40.62	42.41
BaO	2.72	2.42	1.71	1.05	1.11	1.28	0.89	1.73	0.62	0.96	1.04	0.38	—
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.81	6.49	7.04	8.39	7.96	7.13	3.42	7.63	8.20	He опр.	He опр.	He опр.	—
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.83	11.06	11.11	12.15	10.68	12.06	11.38	9.21	11.36	" "	" "	" "	22.42
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.02	1.39	0.82	0.68	1.02	0.95	1.39	0.92	0.60	" "	" "	" "	—
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.03	3.72	2.15	1.64	2.40	2.69	5.16	2.15	2.18	" "	" "	" "	—
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.19	0.05	0.06	0.21	0.04	0.88	0.20	0.09	" "	" "	" "	—
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.02	" "	" "	" "	—
ΣREE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	24.00	21.32	22.57	—
ThO <sub>2</sub>	0.33	0.22	0.43	0.10	0.12	—	—	0.29	—	He опр.	0.66	0.11	—
SiO <sub>2</sub>	0.16	0.26	0.21	0.22	0.15	0.30	0.13	0.39	0.12	0.20	0.45	0.46	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29.72	28.67	29.13	29.53	28.95	29.00	29.71	29.54	31.34	28.88	29.30	28.41	29.10
SO <sub>3</sub>	—	0.03	—	0.03	0.02	—	—	0.01	—	1.12	0.30	0.48	—
F	2.14	2.22	1.70	1.84	2.00	1.98	1.86	2.26	2.10	He опр.	He опр.	1.33	1.22
H <sub>2</sub> O±	0.02*	1.23	0.31*	1.50	0.11*	0.13*	0.32*	0.16*	0.31*	0.89	" "	1.30	1.16
—O—F <sub>2</sub>	0.90	0.93	0.72	0.78	0.84	0.83	0.78	0.95	0.89	—	—	0.50	0.54
Сумма	102.13	98.06	98.57	100.06	99.86	101.16	101.26	102.31	101.41	99.44*	101.25**	99.77**	100.00
n <sub>o</sub>	1.660	1.653	1.656	1.656	1.660	1.660	1.655	1.656	1.656	1.660	1.660	1.660	—
n <sub>e</sub>	1.640	1.634	1.635	1.638	1.634	1.636	1.630	1.633	1.636	1.640	1.640	1.640	—
n <sub>o</sub> - n <sub>e</sub>	0.020	0.019	0.021	0.018	0.026	0.024	0.025	0.023	0.020	0.020	0.020	0.020	—

Примечание. Обр. 1—8 и 10—12 — Локозерский массив; 9 — Хибинский массив, г. Эвельгторр; 13 — теоретический состав NaCeSr<sub>3</sub>(P<sup>IV</sup>O<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(F<sub>0.33</sub>OH<sub>0.67</sub>). Обр. 1, 2, 10 — г. М. Пункарауйв; 3, 12 — г. Карнасурт (12 — залежь «Обильная»); 4 — г. Кельдервараж; 5—8 — различные петматитовые тела г. Алдуайв; 11 — г. Сентисчорр. Обр. 1—9 — данные настоящей работы, 10—12 — литературные данные: 10 — Бородин, Казакова, 1954; 11 — Семенов, 1962; 12 — Буссен и др., 1978. Звездочкой отмечено расчетное содержание H<sub>2</sub>O, двумя — другие компоненты, которые также входят в сумму анализа. Обр. 10 — K<sub>2</sub>O 0.20, MgO 0.16, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.60, обр. 11 — Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.49. П. п. п. 3.55, обр. 12 — Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.15. Спектры REE в ан. 10—12: обр. 10 — Ce:La:Nd : Pr = 1:0.6:0.5:0.2, обр. 11 — La<sub>22</sub>Ce<sub>5</sub>Pr<sub>7</sub>Nd<sub>2</sub>Sm<sub>1</sub>, обр. 12 — La<sub>29</sub>Ce<sub>59</sub>Pr<sub>16</sub>Nd<sub>7</sub>Sm<sub>0.9</sub>.

це краевой (эгириновой) и центральной (уссингитовой) зон пегматита в тесной ассоциации с манганнептунитом, сфалеритом, серандитом, борнеманитом, вуоннемитом, умбозеритом и др. Образец предоставлен П. М. Карташовым.

6. Г. Аллуайв. Уссингитовая жила, секущая уриты, лувяриты, фойяиты и имеющая мощность до 0.4—0,5 м. Беловит-(Ce) образует зерна до 2—3 мм желто-зеленого цвета в уссингите с эвдиалитом, виллиомитом, ломоносовитом, борнеманитом, терскитом, анальцимом, эгирином и др.

7. Г. Аллуайв. Маломощная уссингитовая жила, секущая фойяиты. Толсто-таблитчатый всесторонне огранный кристалл беловита-(Ce) светло-зеленого цвета, имеющий 2 мм в поперечнике и растущий в пустоте уссингита. С ним ассоциируют анальцим, эвдиалит, паракелдышит, стенструпин-(Ce).

8. Г. Аллуайв. Крупное (>3 м) эгирин-альбитовое пегматитовое тело изометричной формы. Беловит-(Ce) дает грубообразованные кристаллы до 20×8 мм желто-зеленого цвета в альбите. Он ассоциирует с сидоренкитом, ненадкевичитом, леллингитом, троней, натроном, сфалеритом. Краевые части кристаллов беловита-(Ce) содержат вросстки бербанкита и окрашены в черный цвет тонко-распыленным битумоидом.

9. Г. Эвслогчорр, Хибинь. Небольшое линзовидное тело в катаклазированных нефелиновых сиенитах. Краевая зона сложена эгирином с эвдиалитом и эпидидимитом, промежуточная — блоковым микроклином. Ядро состоит из анальцима и альбита с небольшим количеством натролита. Беловит-(Ce) найден в виде светло-желтых призматических кристаллов до 7×15 мм в натролите и анальциме с манганнептунитом, эгирином, лейфитом.

Большинство образцов беловита-(Ce) обладает дихроизмом, характерным и для некоторых других редкоземельных минералов — витусита, стиллуэллита: при дневном освещении минерал имеет зеленоватый цвет, а при искусственном — желтый с оранжевым или коричневатым оттенком.

Химический состав. В отличие от предыдущих работ наши определения состава выполнены рентгеноспектральным методом на электроннозондовом микроанализаторе Camebax microbeam (аналитик И. М. Куликова, ИМГПЭ, Москва). Условия анализа стандартные: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока 20 нА, размер пучка зонда 3×3 мкм. Определение фтора осуществлялось по специальной методике при напряжении 10 кВ и силе тока 20 нА в режиме раstra с излучающей поверхностью 12×12 мкм с целью сведения к минимуму ухудшения фтора под электронным пучком. Используемые эталоны: накафит (для Na), фторапатит (Ca), синтетические SrSO<sub>4</sub> (Sr, S), BaSO<sub>4</sub> (Ba), REE(PO<sub>4</sub>) (REE: Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm), ThO<sub>2</sub> (Th), Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (Si), CePO<sub>4</sub> (P), MgF<sub>2</sub> (F). При расчете содержаний всех компонентов применялась программа, учитывающая входжение в состав соединения легких элементов F и Na. Результаты, приведенные в табл. 1, являются средними из 2—4 точечных анализов каждый. Определение содержания воды было выполнено С. П. Пурусовой (ВИМС, Москва) методом поглотительных трубок для обр. 2 (навеска 27 мг) и 4 (33 мг). В остальных анализах приведены расчетные содержания воды.

Химические формулы были получены при пересчете данных из табл. 1 катионным методом на сумму 8 катионов. При этом группировка элементов по позициям проводилась достаточно формально, с учетом обычных изоморфных схем. Авторы, однако, не исключают того, что часть Ca находится в позиции Na и гетероэвалентный изоморфизм проявлен более широко (Надежина и др., 1987).

Химические формулы беловита-(Ce) выглядят следующим образом (см. табл. 1):

1. Na<sub>1.12</sub>(Sr<sub>2.67</sub>Ba<sub>0.13</sub>Ca<sub>0.09</sub>)<sub>2.89</sub>(Ce<sub>0.47</sub>La<sub>0.26</sub>Nd<sub>0.17</sub>Pr<sub>0.04</sub>Sm<sub>0.01</sub>Th<sub>0.01</sub>)<sub>0.96</sub>  
[(P<sub>3.00</sub>Si<sub>0.01</sub>)<sub>3.01</sub>O<sub>12</sub>](F<sub>0.80</sub>OH<sub>0.03</sub>)<sub>0.83</sub> — голотип;
2. Na<sub>1.06</sub>(Sr<sub>2.64</sub>Ba<sub>0.12</sub>Ca<sub>0.09</sub>)<sub>2.85</sub>(Ce<sub>0.50</sub>La<sub>0.30</sub>Nd<sub>0.17</sub>Pr<sub>0.04</sub>Sm<sub>0.02</sub>)<sub>1.03</sub>  
[(P<sub>3.07</sub>Si<sub>0.03</sub>)<sub>3.10</sub>O<sub>11.88</sub>](F<sub>0.88</sub>OH<sub>0.17</sub>)<sub>1.05</sub>;
3. Na<sub>0.94</sub>(Sr<sub>2.88</sub>Ba<sub>0.09</sub>Ca<sub>0.06</sub>)<sub>3.03</sub>(Ce<sub>0.50</sub>La<sub>0.33</sub>Nd<sub>0.09</sub>Pr<sub>0.03</sub>)<sub>0.95</sub>

- [(P<sub>3.04</sub>Si<sub>0.03</sub>)<sub>3.07</sub>O<sub>12</sub>](F<sub>0.67</sub>OH<sub>0.50</sub>)<sub>1.33</sub>;
4. Na<sub>0.93</sub>(Sr<sub>2.77</sub>Ca<sub>0.10</sub>Ba<sub>0.04</sub>)<sub>2.91</sub>(Ce<sub>0.55</sub>La<sub>0.39</sub>Nd<sub>0.07</sub>Pr<sub>0.03</sub>)<sub>1.04</sub>  
[(P<sub>3.08</sub>Si<sub>0.03</sub>)<sub>3.11</sub>O<sub>12.11</sub>](F<sub>0.71</sub>OH<sub>0.35</sub>)<sub>1.06</sub>;
  5. Na<sub>0.98</sub>(Sr<sub>2.93</sub>Ba<sub>0.06</sub>Ca<sub>0.03</sub>)<sub>3.02</sub>(Ce<sub>0.48</sub>La<sub>0.35</sub>Nd<sub>0.10</sub>Pr<sub>0.04</sub>Sm<sub>0.01</sub>)<sub>0.98</sub>  
[(P<sub>2.99</sub>Si<sub>0.01</sub>)<sub>3.00</sub>O<sub>12</sub>](F<sub>0.78</sub>OH<sub>0.17</sub>)<sub>0.95</sub>;
  6. Na<sub>0.97</sub>(Sr<sub>2.90</sub>Ca<sub>0.07</sub>Ba<sub>0.06</sub>)<sub>3.03</sub>(Ce<sub>0.53</sub>La<sub>0.32</sub>Nd<sub>0.12</sub>Pr<sub>0.04</sub>)<sub>1.01</sub>  
[(P<sub>2.95</sub>Si<sub>0.04</sub>)<sub>2.99</sub>O<sub>12</sub>](F<sub>0.75</sub>OH<sub>0.22</sub>)<sub>0.97</sub>;
  7. Na<sub>0.89</sub>(Sr<sub>2.96</sub>Ca<sub>0.06</sub>Ba<sub>0.04</sub>)<sub>3.06</sub>(Ce<sub>0.51</sub>Nd<sub>0.22</sub>La<sub>0.15</sub>Pr<sub>0.06</sub>Sm<sub>0.04</sub>)<sub>0.98</sub>  
[(P<sub>3.05</sub>Si<sub>0.01</sub>)<sub>3.06</sub>O<sub>12</sub>](F<sub>0.72</sub>OH<sub>0.52</sub>)<sub>1.24</sub>;
  8. Na<sub>0.83</sub>(Sr<sub>3.06</sub>Ba<sub>0.10</sub>Ca<sub>0.10</sub>)<sub>3.26</sub>(Ce<sub>0.40</sub>La<sub>0.33</sub>Nd<sub>0.09</sub>Pr<sub>0.04</sub>Sm<sub>0.01</sub>Th<sub>0.01</sub>)<sub>0.88</sub>  
[(P<sub>2.95</sub>Si<sub>0.04</sub>)<sub>2.99</sub>O<sub>12</sub>](F<sub>0.85</sub>OH<sub>0.26</sub>)<sub>1.11</sub>;
  9. Na<sub>1.06</sub>(Sr<sub>2.70</sub>Ca<sub>0.13</sub>Ba<sub>0.03</sub>)<sub>2.86</sub>(Ce<sub>0.50</sub>La<sub>0.35</sub>Nd<sub>0.09</sub>Pr<sub>0.03</sub>)<sub>0.97</sub>  
[(P<sub>3.11</sub>Si<sub>0.01</sub>)<sub>3.12</sub>O<sub>12</sub>](F<sub>0.78</sub>OH<sub>0.50</sub>)<sub>1.28</sub>

Резюмируем основные особенности состава изученных проб беловита-(Ce).

1. Соотношения катионов во всех изученных образцах близки к Sr:Na:REE = 3:1:1.

2. Среди двухвалентных катионов главенствует Sr, примесь Ca незначительна — не выше 1 мас. %.

3. Во всех образцах беловита-(Ce), включая голотип, преобладающим компонентом в позиции дополнительного аниона является фтор.

4. Редкоземельные элементы представлены практически только цериевой подгруппой, количество Y и лантаноидов тяжелее Sm не превышает 0.01 %. Преобладающим элементом в этой позиции является Ce (рис. 1). Хибинский образец отличается повышенным содержанием La.

5. Среди дополнительных анионов главным является F<sup>-</sup>.

Рентгеновское исследование. Рентгеновское изучение наших образцов беловита-(Ce) проводилось на порошковом дифрактометре ДРОН УМ-1. Были получены для различных образцов рентгенограммы, очень схожие по общей картине, но различные по качеству, из которых выбрана наилучшая, имеющая самое большое число рефлексов и узкие хорошо разрешенные интенсивные линии. Это дифрактограмма обр. 5 (пегматитовое тело «Шкатулка», г. Аллуайв), который имеет наиболее стехиометричный состав, близкий к теоретическому, и содержит мало Th (табл. 1). Он также дает самый высококачественный ИК-спектр. Эту рентгенограмму (табл. 2) авторы рекомендуют как эталонную для беловита-(Ce).

На всех наших дифрактограммах беловита-(Ce) установлены достаточно четкие интенсивные рефлексы 001 (7.16—7.20 Å) и 003 (2.39—2.40 Å), не обнаруженные предыдущими исследованиями, вероятно, по причине низкого качества рентгенограммы. Наличие этих отражений подтверждает, что данный минерал не может быть отнесен к пространственным группам P<sub>63</sub>/m или P<sub>63</sub>, в которых базальные рефлексы с нечетными l гаснут (Бокий, Порай-Кошиц,

1964). В то же время с предложенной для беловита-(Ce) пространственной группой P<sub>3</sub> (Клевцова, Борисов, 1964; Надежина и др., 1987) присутствие этих рефлексов хорошо согласуется. Контрольные дифрактограммы апатита (пр. гр. P<sub>63</sub>/m) и стронциоапатита (P<sub>63</sub>), отражений 001 и 003 не содержат.

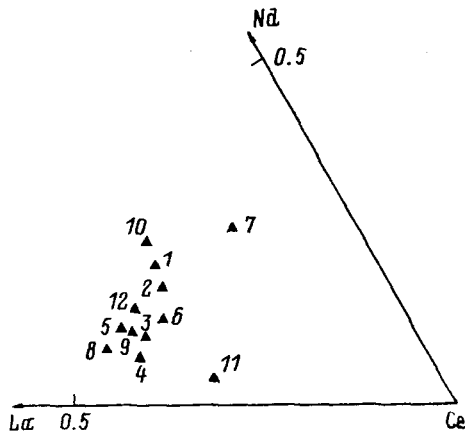


Рис. 1. Соотношение преобладающих редкоземельных элементов в беловите-(Ce). Номера точек соответствуют табл. 1.

Fig. 1. Relationship of the major RE-elements in belovite-(Ce).

Таблица 2

Результаты расчета рентгенограммы порошка и параметры элементарной ячейки беловита-(Ce) из пегматитового тела «Шкатулка», г. Аллуайв, Ловозерский массив

Calculated X-ray powder diffraction data and the unit cell parameters for belovite-(Ce) from Alluauiv Mt., Lovozero

$I, \%$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч}}, \text{Å}$	$hkl$	$I, \%$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч}}, \text{Å}$	$hkl$	$I, \%$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч}}, \text{Å}$	$hkl$
3	8.3	8.12	100	6	2.210	2.225	221	5	1.563	1.560	330
25	7.20	7.20	001	12	2.149	2.146	311	6	1.515	1.524	331
15	5.45	5.39	101	4	2.073	2.065	203	4	1.499	1.498	304 421
22	4.01	{ 4.07 3.92 }	{ 200 111 }	5	1.956	1.961	222	4	1.471	1.470	323
57	3.59	3.60	002	11	1.951	1.951	401	3	1.418	1.418	105
30	3.31	3.29	102	25	1.908	1.907	312	7	1.309	1.308	333
100	2.88	2.86	112	10	1.836	1.825	320	4	1.256	{ 1.261 1.250 }	{ 414 432 }
32	2.79	2.817	211	12	1.809	1.801	321	3	1.187	1.1870	106
4	2.72	2.703	300	25	1.799	1.800	004	9	1.164	{ 1.1651 1.1642 }	{ 433 116 }
8	2.393	2.400	003	3	1.769	1.769	410	3	1.152	1.1506	206
2	2.360	2.340	220	4	1.759	1.757	104	3	1.134	1.1385	325
8	2.320	2.338	212	4	1.653	1.652	322	2	1.102	1.1024	532, 702
6	2.301	2.301	103	5	1.575	1.581	501	2	1.059	1.0586	316
								2	1.043	1.0428	533, 703

Параметры гексагональной ячейки (Å):  $a=9.36(1)$ ,  $c=7.20(1)$

Примечание. Условия съемки: дифрактометр ДРОН УМ-1,  $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучение, Ni-фильтр, внутренний эталон — кремний. Выделены диагностические рефлексы 001 и 003.

**ИК-спектроскопия.** Инфракрасные спектры беловита-(Ce) в литературе отсутствуют. Авторами получены при помощи спектрофотометра Specord 75 IR ИК-спектры этого минерала, для сравнения — спектры природных образцов чистого фторапатита, REE-Sr-содержащих разностей апатита, а также собственно стронциоapatита и синтетического  $\text{Sr}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$  со структурой апатита.

В ИК-спектре фторапатита из Слюдянки (рис. 2) в области 400—4000  $\text{см}^{-1}$  присутствуют полосы: 3550  $\text{см}^{-1}$  (слабая, валентные колебания  $\text{OH}^-$ ); 1460 и 1430  $\text{см}^{-1}$  (слабые, антисимметричные валентные колебания карбонат-ионов с пониженной симметрией); группа полос 1096 (очень сильная), 1075 (плечо) и 1045 (очень сильная)  $\text{см}^{-1}$  с как минимум пятью компонентами сложной формы [четырежды вырожденная полоса антисимметричных валентных колебаний  $\nu_3(\text{F}_2)$  фосфат-ионов]; 966  $\text{см}^{-1}$  [синглет средней интенсивности, относящийся к невырожденным симметричным колебаниям  $\nu_1(\text{A}_1) \text{PO}_4^{3-}$ ]; 880  $\text{см}^{-1}$  (плечо, неплоское валентное колебание  $\text{CO}_3^{2-}$ ); группа полос 600 (сильная), 574 (сильная) и 570 (слабое плечо)  $\text{см}^{-1}$  [четырежды вырожденная полоса деформационных колебаний  $\nu_4(\text{F}_2) \text{PO}_4^{3-}$ ]. Полоса при 460  $\text{см}^{-1}$ , по данным В. М. Батнагара (1967), может относиться к разностному тону  $\nu_3 - \nu_4$ . Аналогично полосе при 720  $\text{см}^{-1}$  можно отнести к разностной моде  $\nu_3 - \nu_2$ . Большое число компонент полосы объясняется снятием вырождения вследствие снижения симметрии  $\text{PO}_4^{3-}$ -иона в структуре, а также кристаллического расщепления.

ИК-спектр стронциоapatита (рис. 2) аналогичен спектру апатита, отличаясь

лишь некоторым смещением полос в более низкочастотную область, что вызвано вхождением в структуру стронция, более тяжелого, чем кальций.

ИК-спектр беловита-(Ce) (рис. 2) по общему характеру близок к спектрам апатита и стронциоапатита, но имеет ряд четких индивидуальных особенностей, характеризующихся в первую очередь более сложной картиной расщеплений.

Лучше всего разрешены полосы в наиболее стехиометричном обр. 4, 5. Отсутствие расщепления невырожденной полосы при  $951\text{ см}^{-1}$  говорит о существовании в структуре беловита-(Ce) искаженных  $\text{PO}_4$ -тетраэдров только одного типа. Таким образом, за расщепление полос ответствен прежде всего характер снятия вырождения по локальной симметрии окружения тетраэдров. Дополнительное расщепление может быть вызвано резонансом Ферми между  $\nu_3$  и  $\nu_4$  с учетом того, что отношение частот  $\nu_3$  и  $\nu_4$  для некоторых полос близко к двум (фактор, отсутствующий в случае апатита).

Чтобы учесть роль симметрии в чистом виде, рассмотрим область  $\nu_4$ . Здесь в спектре беловита-(Ce) наблюдается четкий триплет (а с учетом тонкой структуры полосы при  $546\text{ см}^{-1}$  — четыре компоненты). Это свидетельствует о дополнительном по сравнению с апатитом понижении симметрии тетраэдров и полном снятии запретов по симметрии. Наиболее вероятное объяснение этому явлению — снижение симметрии окружения  $\text{PO}_4$ -тетраэдров за счет распределения различных по массе, размеру, заряду катионов (Sr, Na, REE) по самостоятельным позициям в структуре.

Отклонения от стехиометрии и возрастание содержания изоморфных примесей в беловите-(Ce) приводят к дополнительному уширению всех полос в ИК-спектре по механизму, описанному Л. В. Берляндом с соавторами (1991).

О «беловитовой» и других схемах изоморфизма в минералах группы апатита. Беловит-(Ce) и стронциоапатит — характерные формы обогащенных стронцием ультраапатитовых пегматитов (Хомяков, 1990) — «заместители» неустойчивого здесь апатита. В несколько менее щелочных образованиях — собственно апатитовых породах и большинстве их пегматитов — распространен уже фторапатит, содержащий типоморфные примеси Sr и обычно в меньших

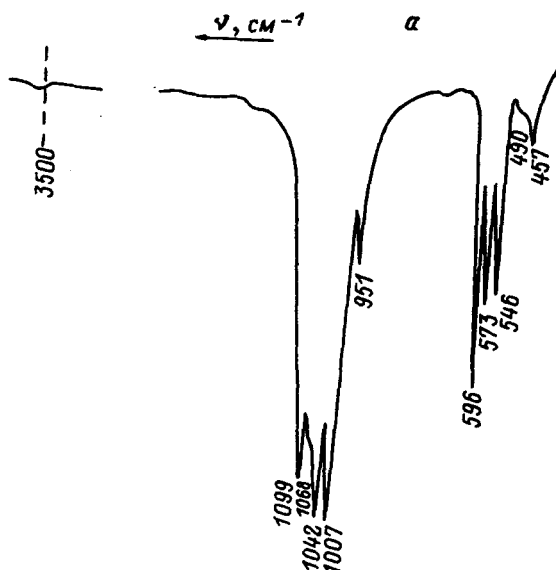


Рис. 2. ИК-спектры беловита-(Ce), стронциоапатита и фторапатита.

α — беловит-(Ce), пегматитовое тело «Шкаутулка», г. Аллуайв, Ловозеро; б — стронциоапатит, г. Расвумчорр, Хибины; в — фторапатит, Слодянка, Прибайкалье.

Fig. 2. IR spectra of belovite-(Ce) (α), strontium-apatite (б) and fluorapatite (в).

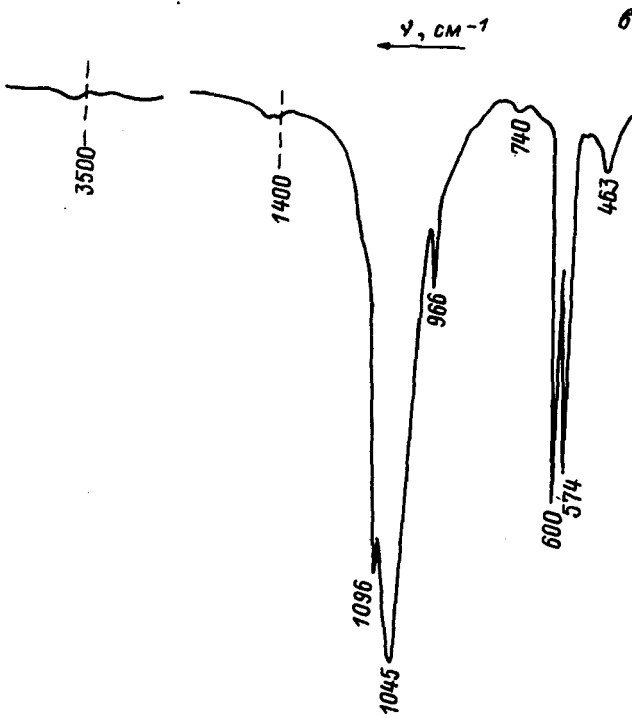
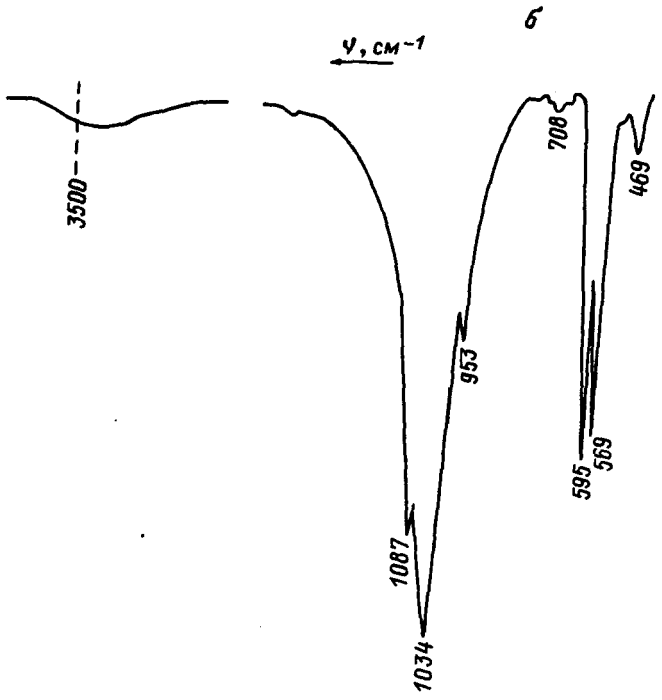


Рис. 2 (продолжение).



Таблица 3

Химический состав стронциоапатита и апатита (мас. %)  
 Chemical composition of strontium-apatite and apatite (% wt)

Компо- нент	14	15	16	17	18	19	20	21
Na <sub>2</sub> O	0.29	0.64	0.59	0.69	0.13	0.74	0.82	3.09
CaO	17.30	10.80	17.82	31.29	46.32	43.17	45.20	38.30
SrO	46.40	46.06	45.13	24.82	10.70	9.92	9.55	—
BaO	0.58	2.70	0.91	—	—	—	—	—
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.77	He опр.	1.00	He опр.	He опр.	He опр.	1.61	4.95
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.63	" "	1.36	" "	" "	" "	2.08	8.79
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	" "	—	" "	" "	" "	0.31	0.70
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	" "	0.44	" "	" "	" "	0.05	2.23
ΣREE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	He опр.	3.73	He опр.	5.56	0.60	4.89	He опр.	He опр.
SiO <sub>2</sub>	—	0.90	0.19	0.68	0.39	0.22	0.22	0.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	33.06	30.44	33.81	34.07	39.43	39.03	38.31	37.50
CO <sub>2</sub>	—	He опр.	He опр.	0.20	0.02	—	He опр.	He опр.
F	2.05	1.67	1.28	3.15	2.97	2.00	1.88	" "
H <sub>2</sub> O±	—	0.61	He опр.	0.62	0.22	0.40	0.69	" "
-O-F <sub>2</sub>	0.86	0.70	0.55	1.31	1.25	0.84	0.79	—
С у м м а	100.22	99.74*	102.00*	99.77	99.66	100.78*	99.93	95.95

Примечание. Обр. 14—16 — стронциоапатит: 14 — Расвумчорр, Хибинь; 15, 16 — Инагла, Ю. Якутия. Обр. 17—20 — Sr- и REE-содержащие разновидности апатита: 17 — г. Ньюоркпахк, Хибинь; 18 — г. Эвселогчорр, Хибинь; 19, 20 — г. Лепхе-Нельм, Ловозеро. Обр. 21 — NaREE-содержащий апатит, Илимгаусак, Гренландия. Обр. 16, 17, 18, 20 — данные настоящей работы (16, 20 — аналитик И. М. Куликова, 17, 18 — аналитик Л. Ф. Ганнибал). Обр. 14 — Хомяков, 1990; обр. 15 — Ефимов и др., 1962; обр. 19 — Семенов, 1962; обр. 21 — Rønbo, 1989. Звездочками отмечены другие компоненты, которые также входят в сумму анализа: обр. 15 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.40, MgO 1.64, ThO<sub>2</sub> 0.60, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.15, K<sub>2</sub>O 0.10; обр. 16 — Cl 0.02; обр. 19 — MgO 0.04, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.16, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.20.

количествах REE и Na. Содержание SrO колеблется обычно в пределах 1—10 мас. % (Кравченко и др., 1979), редко более; самое высокое отмечено в минерале из апатит-полевошпатовой жилы в гнейсовидных нефелиновых сиенитах на г. Ньюоркпахк (Хибинь) — 24.8 % (табл. 3). Во многих анализах апатита содержания Na и REE четко коррелируют (Na:REE~1), что традиционно объясняется изоморфной схемой  $Na^+ + REE^{3+} \approx 2Ca^{2+}$ ; наряду с этим отмечается, что строгой зависимости между содержаниями Sr и REE не наблюдается, хотя разновидности, содержащие повышенные количества REE, как правило, обогащены также и Sr (Семенов, 1962). Авторы же, напротив, обратили внимание, что соотношение примесей Sr:Na:REE~3:1:1 (ат. кол-ва) нередко встречается в апатите (Кравченко и др., 1979). Такая же корреляция между Sr, Na и REE получена при пересчете химического анализа (Семенов, 1962) крупных кристаллов желто-зеленого REE-Sr-апатита («саамита») из мощного натролитового тела г. Лепхе-Нельм, Ловозерский массив. Авторы, дополнительно проанализировав этот материал электрозондовым методом (табл. 3), изучили его рентгенографически и с помощью ИК-спектроскопии.

Дифрактограмма «саамита» отвечает обычному апатиту с чуть увеличенными межплоскостными расстояниями. ИК-спектр тоже идентичен спектру апатита, отличаясь от него небольшим сдвигом полос в низкочастотную область и их уширением. По величине этого сдвига он хорошо укладывается в ряд от чистого фторапатита через апатиты с разным содержанием Sr и природный хибинский стронциоапатит до синтетического Sr<sub>5</sub>[PO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>F; число и относительные интенсивности полос не меняются, наблюдается лишь их закономерное смещение в зависимости от величины Sr/Ca соотношения (табл. 4). Однако наш «саамит» с соотношением Sr:Na:REE~3:1:1 существенно от них отличается осо-

Таблица 4

Главные максимумы в ИК-спектрах поглощения ( $\text{см}^{-1}$ ) минералов ряда фторапатит-стронциоapatит и синтетического  $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$

Principal maximums in the IR absorption spectra of minerals within range «fluorapatite — strontium-apatite» and synthetic compound  $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  ( $\text{см}^{-1}$ )

Образец	CaO, мас. %	SrO, мас. %	REE <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мас. %	Частоты максимумов поглощения, $\text{см}^{-1}$
Фторапатит, Слодянка	55.6	—	—	463 <u>574</u> <u>600</u> <u>966</u> <u>1045</u> 1096
№ 18	46.3	10.7	0.6	466 <u>574</u> <u>600</u> <u>962</u> <u>1042</u> 1093
№ 20	43.2	10.7	4.1	464 <u>570</u> <u>598</u> <u>962</u> <u>1038</u> 1092
№ 17	31.3	24.8	5.6	463 <u>570</u> <u>599</u> <u>958</u> <u>1038</u> 1092
№ 14	17.3	46.4	1.4	460 <u>569</u> <u>595</u> <u>953</u> <u>1034</u> 1087
Синтетический $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	—	69.8	—	463 <u>566</u> <u>594</u> <u>952</u> <u>1032</u> 1085

Примечание. Номера образцов см. в табл. 3. Подчеркнуты наиболее интенсивные, хорошо разрешенные максимумы. Условия съемки: залповый в КВГ; частоты измерены по полосам эталона — газообразного аммиака, с поправкой на «дрейф» прибора.

бенностями разностного ИК-спектра, полученного вычитанием спектральной кривой чистого фторапатита (рис. 3).

Здесь наблюдается «беловитовый» характер группы полос  $\nu_4$ , а меньшая по сравнению с беловитом-(Ce) величина расщепления между низкочастотными компонентами  $\nu_4$  обусловлена, очевидно, локальностью соответствующих колебаний. Объединение беловитоподобных фрагментов в периодическую структуру внутри кристалла апатита приводит к возникновению частотных зон, в ИК-спектрах которых, согласно правилам отбора, активны только краевые частоты зон, порождаемых  $\nu_4$ ; в результате величина расщепления возрастает (рис. 3). По всей видимости, здесь мы имеем дело не с беловитом как фазой в привычном понимании, а с «островками» (кластерами) беловитовой структуры, связавшими в себе примеси Sr, Na, REE и имеющими размеры существенно менее 1 мкм, так что лишь наиболее чувствительная методика позволяет их выявить. Валовой состав нашего «саамита» описывается формулой  $(\text{Ca}_{4.32}\text{Sr}_{0.49}\text{Na}_{0.14}\text{REE}_{0.13})_{5.08}[(\text{P}_{2.89}\text{Si}_{0.02})_{2.91}\text{O}_{11.71}](\text{F}_{0.52}\text{OH}_{0.46})_{0.98}$ . Пересчет на минералы — фторапатит  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH})$  и беловит  $\text{NaREE}\text{Sr}_3[\text{PO}_4]_3(\text{F},\text{OH})$  — дает соотношение: 85 % апатита и 15 % беловита.

Судя по результатам расшифровки кристаллической структуры стронцио-apatита (Пушаровский и др., 1987) и ИК-спектроскопическим данным авторов (табл. 4), существование непрерывного изоморфного ряда между природным фторапатитом и стронциоapatитом (схема  $\text{Ca}^{2+} \rightleftharpoons \text{Sr}^{2+}$ ) весьма вероятно. Наряду с этим явления, обнаруженные в «саамите» с г. Лепхе-Нельм, могут свидетельствовать в пользу того, что совместное нахождение в апатите примесей Sr, Na, REE уже в количестве первых процентов может приводить к обособлению беловитоподобных (вероятно, упорядоченных) фрагментов в теле кристалла апатита. По сути речь идет о специфической «беловитовой» схеме изоморфизма  $3\text{Sr}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{REE}^{3+} \rightleftharpoons 5\text{Ca}^{2+}$  в апатите, которая, вероятно, существует наряду с другими: «стронциоapatитовой»  $\text{Sr}^{2+} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+}$  и «бритолитовой»  $\text{REE}^{3+} + \text{Si}^{4+} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{P}^{5+}$ . Возможно, они могут сочетаться, особенно «беловитовая» со «стронциоapatитовой», при учете того, что последняя затрагивает при малых содержаниях Sr лишь семивершинные катионные полиэдры (Пушаровский и др., 1987).

Интерес вызывают опубликованные И. Майером с соавторами (1974) данные

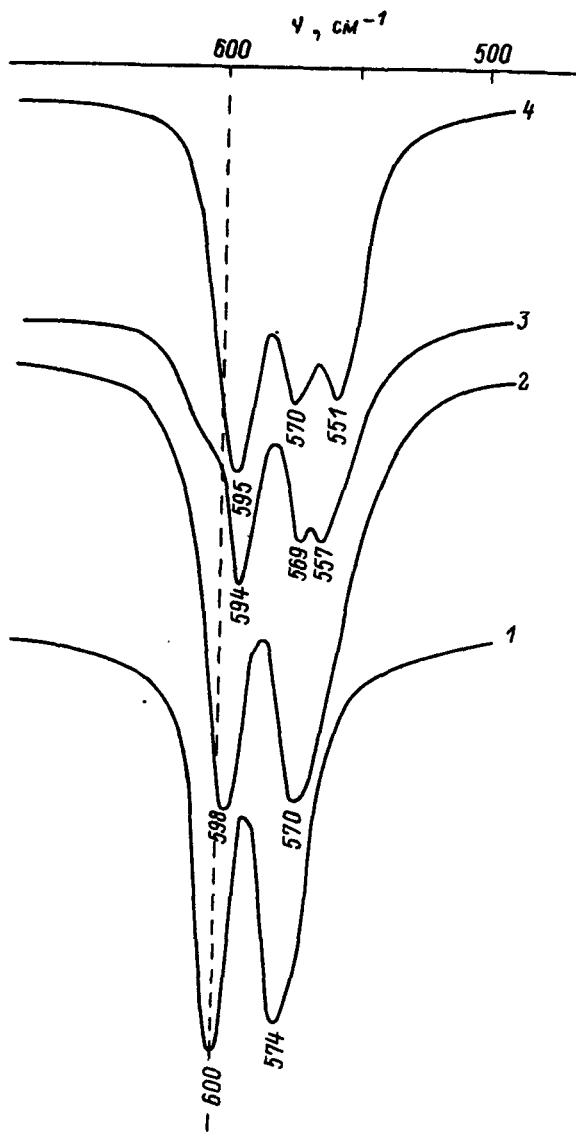


Рис. 3. Характер расщепления полос, отвечающих деформационным колебаниям  $\text{PO}_4$ -тетраэдров, в ИК-спектрах минералов группы апатита.

1 — фторалатит, Слодянка, Прибайкалье; 2 — «саамит», г. Лепже-Нельм, Ловозеро; 3 — разностный спектр, полученный вычитанием значений спектральной кривой 1 из значений 2; 4 — беловит-(Ce), г. Кедькверпаж, Ловозеро.

Fig. 3. Splitting of bands in the field of  $\text{PO}_4$ -tetrahedrons banding vibration for IR spectra of fluorapatite, «saamite» and belovite-(Ce).

о синтезе стехиометричных соединений со структурой апатита типов  $\text{Na}_6\text{M}_6^{2+}\text{REE}_2^{3+}[\text{PO}_4]_6\text{F}_2$ ,  $\text{Na}_3\text{M}_4^{2+}\text{REE}_3^{3+}[\text{PO}_4]_6\text{F}_2$  и  $\text{Na}_4\text{M}_2^{2+}\text{REE}_4^{3+}[\text{PO}_4]_6\text{F}_2$ , где  $\text{M}^{2+}$  — Ca, Sr, Ba;  $\text{REE}^{3+}$  — Y, La, Pr, Nd, Sm, Eu. Всего приводятся сведения о 21 фазе, из которых 9 отвечают стехиометрии беловита —  $\text{Na}_2\text{M}_6^{2+}\text{REE}_2^{3+}$ , причем  $\text{M}^{2+}$  — Ca, Sr, Ba (Mayer e. a., 1974). Не исключено, видимо, и существование кальциевых и даже бариевых аналогов беловита в природе. В этой связи примечателен описанный Й. Ронсбо (1989) в Илимаусаке (Гренландия) апатит со значительными содержаниями REE и Na. Он был найден в жиле щелочного пегматита, сложенного альбитом, эгирином, калиевым полевым шпа-

Таблица 5

Диагностические константы беловита-(Ce) и соотношение его с апатитом и стронциоапатитом  
 Diagnostic constants of belovite-(Ce) and its relationship with apatite and strontium-apatite

Характеристика	Беловит-(Ce)	Стронциоапатит	Фторапатит
Химическая формула	$\text{Na}(\text{Ce}, \text{La})\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$	$(\text{Sr}, \text{Ca})_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$
Симметрия	Тригональная	Гексагональная	Гексагональная
Пространственная группа	$P3$	$P6_3$	$P6_3/m$
Диагностические рефлексы рентгенограммы, Å			
001	7.16—7.20	Отсутствуют	Отсутствуют
003	2.39—2.40		
Максимумы поглощения в ИК-спектре в области 500—600 см <sup>-1</sup>	Триплет ~545 ~570 ~595	Дублет ~570 ~595	Дублет ~575 ~600
Двуупределение $n_o - n_e$	0.018—0.026	0.006—0.014	0.005

том, в ассоциации в эвдиалитом, торитом, кварцем. В его составе, приведенном в табл. 3, наблюдаются следующие соотношения:  $(\text{Ca}_{7.69}\text{REE}_{1.23}\text{Na}_{1.12})_{10.04}(\text{P}_{5.95}\text{Si}_{0.07})_{6.02}$ . Й. Ронсбо предположил для него изоморфную схему  $\text{Na}^{+} + \text{REE}^{3+} \rightleftharpoons 2\text{Ca}^{2+}$  и содержание 25 % гипотетического конечного члена  $\text{Na}_5\text{REE}_5(\text{PO}_4)_6(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_2$  (Rønnsbo, 1989). Авторы же, с учетом данных И. Майера (1974), не исключают возможности вхождения Na и REE в этот минерал в виде «островков» (кластеров)  $\text{NaREECa}_3(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$  — кальциевого аналога беловита. Пересчет формулы гренландского минерала на минералы дает 53 % апатита и 47 % кальциевого беловита, т. е. приблизительно равные соотношения. При общей обедненности пород массива Илимаусак стронцием (Семенов, 1969) именно здесь можно ожидать появления в ультраапатитовых парагенезисах кальциевых аналогов беловита.

**Обсуждение результатов.** Выполненные на представительном по объему материале исследования беловита-(Ce) показали, что этот минерал характеризуется постоянным составом и устойчивой стехиометрией. Во всех образцах, включая голотип беловита-(Ce), хранящийся в Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана РАН, в позиции дополнительного аниона фтор преобладает над гидроксильной группой. ИК-спектроскопические и порошковые рентгеновские данные авторов подтверждают вывод о понижении симметрии беловита-(Ce) по сравнению с апатитом и стронциоапатитом, что обусловлено упорядоченным распределением катионов (Sr, Na, REE) по трем самостоятельным позициям (Клевцова, Борисов, 1964; Надежина и др., 1987). Это позволяет рассматривать беловит как собственно редкоземельный минерал, название которого, с учетом правила Левинсона, должно включать в качестве суффикса символ преобладающего REE (Levinson, 1966). Во всех изученных образцах доминирует церий, т. е. они отвечают беловиту-(Ce), уточненная формула которого имеет вид  $\text{Na}(\text{Ce}, \text{La})\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$ .

Наиболее экспрессно определяемыми диагностическими признаками беловита-(Ce) являются наличие рефлексов 001 и 003 на рентгенограмме, характер ИК-спектра, а из оптических свойств — высокое двуупределение (табл. 5).

В кристаллах REE-Sr-апатита («саамита») допустимо существование «островков» субмикронного размера, по ИК-спектроскопическим характеристикам отвечающее беловиту. Если это так, то есть основание предположить, что совместное накопление примесей Sr, Na, REE в апатите уже в небольших количествах может приводить к обособлению их в кластеры беловитоподобной структуры в теле кристалла-хозяина. Возможно, мы здесь имеем дело со схемой изоморфизма  $3\text{Sr}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{REE}^{3+} \rightleftharpoons 5\text{Ca}^{2+}$ , условно названной «беловитовой».

Наряду с этим данные по синтетическим апатитоподобным соединениям (Mayer e. a., 1974) и факт находки в Гренландии бесстронциевого апатита с аномально высокими содержаниями Na и REE (Rønso, 1989) допускают существование в природе кальциевого и даже бариевого минералов со стехиометрией и структурой беловита. Не исключена и возможность нахождения аналогов беловита-(Ce) с иными максимумами REE (La, Nd...) или минералов с действительным преобладанием гидроксильных групп в позиции дополнительного аниона.

Авторы благодарят С. Н. Бритвину, П. М. Карташова, Н. И. Фришмана, предоставивших материал для исследования, В. Г. Шлыкова за помощь в работе, а также Т. Н. Надежину и Г. И. Дорохову, участвовавших в обсуждении статьи.

#### Список литературы

- Батнагар В. М. Инфракрасный спектр апатита из месторождения Кукисвумчорр (Кольский полуостров, СССР) // Ж. структ. химии. 1967. Т. 8. № 2. С. 361—362.
- Бокий Г. Б., Порай-Кошиц М. А. Рентгеноструктурный анализ. Т. 1. М.: Изд. МГУ, 1964. 489 с.
- Бородин Л. С., Казакова М. Е. Беловит — новый минерал из щелочных пегматитов // Докл. АН СССР. 1954. Т. 96. № 3. С. 613—616.
- Буссен И. В., Еськова Е. М., Меньшиков Ю. П. и др. Минералогия ультращелочных пегматитов // Проблемы геологии редких элементов. М., 1978. С. 251—271.
- Ефимов А. Ф., Кравченко С. М., Васильева З. В. Стронциоапатит — новый минерал // Докл. АН СССР. 1962. Т. 142. № 2. С. 439—442.
- Клевцова Р. Ф., Борисов С. В. Кристаллическая структура беловита // Ж. структ. химии. 1964. Т. 5. № 2. С. 151—153.
- Кравченко С. М., Беляков А. Ю., Минеев Д. А. Новые данные по минералогии северо-западного сектора расслоенной ийолит-уртитовой интрузии Хибинского массива // Новые данные по минералогии месторождений щелочных формаций. М., 1979. С. 29—65.
- Надежина Т. Н., Пушаровский Д. Ю., Хомяков А. П. Уточнение кристаллической структуры беловита // Минер. журн. 1987. Т. 9. № 2. С. 45—48.
- Пушаровский Д. Ю., Надежина Т. Н., Хомяков А. П. Кристаллическая структура стронций-апатита из Хибин // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 4. С. 891—896.
- Семенов Е. И. Минералогия Ловозерского щелочного массива. М., 1972. 307 с.
- Семенов Е. И. Минералогия щелочного массива Илимаусак. М., 1969. 165 с.
- Семенов Е. И. Минералы группы апатита в пегматитах Ловозерского щелочного массива // Редкие элементы в массивных щелочных породах. М.: ИМГРЭ, 1962. С. 36—54.
- Хомяков А. П. Минералогия ультраапатитовых щелочных пород. М., 1990. 194 с.
- Berlyand L. V., Chukanov N. V., Dubovitsky V. A. Exactly solvable random model and IR spectroscopy of a strained defective lattice // Chem. Phys. Lett. 1991. Vol. 181. № 5. P. 450—454.
- JCPDS. Powder diffraction data.
- Levinson A. A. A system of nomenclature for rare-earth minerals // Amer. Miner. 1966. Vol. 51. N 1/2. P. 152—158.
- Mayer J., Roth R. S., Brown W. E. Rare earth substituted fluoride-phosphate apatites // J. Solid State Chem. 1974. Vol. 11. P. 33—37.
- Miyawaki R., Nakai I. Crystal structures of rare earth minerals // Handbook Phys. Chem. RE. 1993. Vol. 16.
- Nickel E. H., Nichols M. C. Mineral reference manual. New York, 1991. 250 p.
- Rønso J. G. Coupled substitutions involving REEs and Na and Si in apatites in alkaline rocks from the Ilimaussaq intrusion, South Greenland, and the petrological implications // Amer. Miner. 1989. Vol. 74. N 7/8. P. 896—901.

Московский университет  
Институт химической физики РАН,  
Черноголовка

Институт минералогии, геохимии, кристаллохимии  
редких элементов (ИМГРЭ) РАН,  
Москва  
Геологический институт КНЦ РАН,  
Апатиты

Поступила в редакцию  
22 августа 1994 г.