

Sahama Th. G., Hytönen K. Delhayelite, a new silicate from the Belgian Congo // *Miner. Mag.* 1959. Vol. 32. P. 6—9.

Spek A. L. Single-crystal structure validation with the program PLATON // *J. Appl. Crystallogr.* 2003. Vol. 36. P. 7—13.

Поступила в редакцию
26 февраля 2010 г.

УДК 549.641.46 + 548.65 (470.21)

ЗРМО, № 4, 2010 г.
Zapiski RMO, N 4, 2010

© Д. чл. И. В. ПЕКОВ, * Л. В. ОЛЫСЫЧ, * д. чл. Н. В. ЧУКАНОВ, ** К. В. ВАН, ***
д. чл. Д. Ю. ПУЩАРОВСКИЙ*

**ДЕПМАЙЕРИТ $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{PO}_4, \text{CO}_3)_{1-x} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($x < 0.5$) —
НОВЫЙ МИНЕРАЛ ГРУППЫ КАНКРИНИТА
ИЗ ЛОВОЗЕРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ)¹**

* Московский государственный университет, 119992, Москва, Воробьевы горы;
e-mail: igorpekov@mail.ru

** Институт проблем химической физики РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка

*** Институт экспериментальной минералогии РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка

Новый минерал депмайерит, первый член из группы канкринита с видообразующим внекаркасным анионом PO_4^{3-} и упрощенной формулой $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{PO}_4, \text{CO}_3)_{1-x} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($x < 0.5$), установлен на горе Карнасурт, Ловозерский щелочной массив. В группе канкринита выделена подгруппа канкринита *sensu stricto*, объединяющая шесть минералов с каркасом типа АВ, минимальной возможной элементарной ячейкой и цепочкой $[\cdots\text{Na}\cdots\text{H}_2\text{O}\cdots]^\infty$ в узком канале: канкринит, вишневит, канкрисилит, гидроксиканкринит, кианоксалит и депмайерит.

Ключевые слова: депмайерит, новый минерал, группа канкринита, подгруппа канкринита *sensu stricto*, кристаллическая структура, ультращелочная гидротермальная минерализация, Ловозерский щелочной массив, Кольский полуостров.

I. V. PEKOV, L. V. OLYSICH, N. V. CHUKANOV, K. V. VAN, D. Yu. PUSHCHAROVSKY.

DEPMEIERITE $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{PO}_4, \text{CO}_3)_{1-x} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($x < 0.5$) — A NEW CANCRINITE GROUP
MINERAL FROM THE LOVOZERO ALKALINE MASSIF (KOLA PENINSULA, RUSSIA)

A new mineral depmeierite, first member of the cancrinite group with the species-defining extra-framework anion PO_4^{3-} , has been found at Karnasurt Mt., in the Lovozero alkaline massif (at Kola Peninsula, Russia). Natrolite and depmeierite are the major components of a peralkaline hydrothermal veinlet (1.5 cm thick) cross-cutting the rocks of a foyaite-urtite-lujavrite complex. Associated minerals are steensstrupine-(Ce), vuonnemite, epistolite, sodalite, aegirine, serandite, natisite and vitusite-(Ce). Depmeierite forms colorless, transparent, isometric grains up to 1 cm. Luster is vitreous. The mineral is brittle, cleavage is (100) perfect. Mohs' hardness 5. $D(\text{meas}) = 2.321(1)$, $D(\text{calc}) = 2.313$ g/cm³. Depmeierite is optically biaxial positive, $\omega = 1.493(2)$, $\varepsilon = 1.497(2)$. IR spectrum is given. Chemical composition (wt %; averaged for 10 electron-microprobe analyses, H₂O and CO₂ by selective sorption) is: Na₂O 23.04, K₂O 0.54, Fe₂O₃ 0.03, Al₂O₃ 29.07, SiO₂ 36.48, P₂O₅ 3.30, SO₃ 0.08, CO₂ 0.97, H₂O 5.93, total 99.44. The empirical formula based on (Si,Al)₁₂O₂₄ is: (Na_{7.58}K_{0.12})_{Σ7.70}(Si_{6.19}Al_{5.81}O₂₄)[(PO₄)_{0.47}(CO₃)_{0.22}(OH)_{0.02}(SO₄)_{0.01}]_{Σ0.72} · 3.345H₂O. The simplified formula is: $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{CO}_3)_{1-x} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($x < 0.05$). Depmeierite is hexagonal, space group P6₃, unit-cell dimensions are: $a = 12.7345(2)$, $c = 5.1798(1)$. $V = 727.46(2)$ Å³, $Z = 1$. The strongest reflections of the X-ray powder diagram (d , Å — $I[hkl]$) are: 6.380-30[110]; 4.695-91[101]; 3.681-37[300]; 3.250-100[211]; 2.758-33[400], 2.596-31[002], 2.121-24[330, 302]. Crystal structure was studied on a single crystal, $R_{hkl} = 0.0362$. Depmeierite differs from cancrinite in the contents of wide channel containing Na cations, H₂O molecules and anionic groups PO_4^{3-} (prevailing) and CO_3^{2-} . The mineral is named in honor of the German crystallographer Wulf Depmei-

¹ Новый минерал депмайерит и его название одобрены Комиссией по новым минералам РМО и утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов ММА 1 декабря 2009 г., IMA No 2009-075.

er (b. 1944). The type specimen is deposited in Fersman Mineralogical Museum of the RASc., Moscow. The cancrinite *sensu stricto* subgroup is defined within the cancrinite group. It includes six minerals with the *AB* framework, the smallest unit cell ($a \approx 12.55\text{--}12.75$, $c \approx 5.1\text{--}5.4 \text{ \AA}$) and the chain $[\cdots\text{Na}\cdots\text{H}_2\text{O}\cdots]^\infty$ in narrow channel: cancrinite, vishnevite, cancrisilite, hydroxycancrinite, kyanoxalite and depmeierite. The phosphorus-bearing varieties of cancrinite-group minerals and conditions of formation of non-carbonate members of the group in the derivatives of intrusive alkaline complexes are discussed.

Key words: depmeierite, new mineral, cancrinite group, cancrinite *sensu stricto* subgroup, crystal structure, peralkaline hydrothermal mineralization, Lovozero alkaline complex, Kola Peninsula.

ВВЕДЕНИЕ

К группе канкринита относятся гексагональные и тригональные фельдшпатоиды с цеолитными каналами и полостями, которые содержат крупные щелочные и щелочноземельные катионы (видообразующие: во всех случаях Na^+ , иногда также K^+ , Ca^{2+}) и дополнительные, или внекаркасные анионы (видообразующие: CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , OH^- , S^{2-} , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$), а также в большинстве случаев молекулы H_2O . Каркасы этих минералов состоят из шестичленных колец тетраэдров SiO_4 и AlO_4 , лежащих в плоскости *xу* и образующих слои. В пределах одного слоя кольца не соприкасаются между собой: каждое из них сочленяется по общим *O*-вершинам тетраэдров с тремя кольцами вышележащего слоя и с тремя — нижележащего. Таким образом, каждый слой сдвинут относительно соседних на $1/3$ периода повторяемости по оси *x* или *y*. В результате в канкринитоподобных структурах реализуются слои трех типов, в состав каждого из которых входят кольца только одного сорта, центрированные осями 6-го или 3-го порядка: $[1/3 \ 2/3 \ z]$, $[2/3 \ 1/3 \ z]$, $[0 \ 0 \ z]$. Эти слои принято обозначать буквами *A*, *B*, *C* соответственно. Тип каркаса определяется последовательностью укладки слоев разных типов (*A*, *B*, *C*) вдоль оси *c* (Bonaccorsi, Merlino, 2005).

До настоящего времени в группе канкринита был известен 21 минеральный вид. Большинство из них относится к редким, лишь канкринит и (в меньшей степени) вшневит распространены в щелочных интрузивных комплексах, где иногда играют роль породообразующих в некоторых магматических породах и особенно в постмагматических образованиях. Эти два минерала, а также давин, канкрисилит, гидроксиканкринит и недавно открытые кианоксалит (Чуканов и др., 2009) и баллираноит (Chukanov et al., 2010) имеют простейший *Al*, *Si*, *O*-каркас — двухслойный с периодом повторяемости *AB* — и элементарные ячейки с минимальным из возможных для членов группы канкринита объемом (параметры: $a \approx 12.55\text{--}12.75$, $c \approx 5.1\text{--}5.4 \text{ \AA}$).

Новый канкринитоподобный минерал, описываемый в настоящей статье, содержит в качестве преобладающего (видообразующего) внекаркасного аниона PO_4^{3-} , чем отличается от всех ранее известных представителей группы. Он получил название **депмайерит** в честь немецкого кристаллохимика Вульфа Хельмута Хайнца Депмайера (Wulf Helmut Heinz Depmeier) (р. 1944), профессора минералогии и кристаллографии в Университете Христиана Альбрехта, Киль, Германия. В. Депмайер широко известен как специалист в области кристаллохимии минералов и синтетических соединений, относящихся к структурному семейству содалита—канкринита.

Эталонный образец депмайерита передан в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве, регистрационный № 3882/1.

УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ

Депмайерит найден на горе Карнасурт в северной части Ловозерского щелочного массива на Кольском полуострове (Россия). Он установлен нами в образцах из подземных выработок рудника Карнасурт, разрабатывающего одноименное редкометалльное (лопаритовое) месторождение. Этот материал был собран в 1980-х гг. геологами Ловозерского ГОКа.

Изученные образцы представляют собой фрагменты прожилка мощностью 1.5 см, секущего агпаитовые породы дифференцированного фойяит-уртит-луавритового комплекса Ловозерской интрузии. Наиболее представительную информацию об этом

комплексе пород можно найти в книге И. В. Буссен и А. С. Сахарова (1972), а связанная с ним ультращелочная гидротермальная прожилковая минерализация охарактеризована в обобщенном виде А. П. Хомяковым (1990) и более детально — И. В. Пековым (2000).

Основной объем описываемого прожилка состоит из крупнозернистых агрегатов тесно сросшихся депмайерита (изометричные индивиды до 1 см без внешней окантовки) и натролита, причем первый преобладает. Тонкие призальбандовые зоны прожилка обладают более разнообразным минеральным составом: здесь присутствуют стенструпин-(Ce), вуоннемит (частично измененный в эпистолит), содалит, небольшие количества эгирина, серандита, натисита и витусита-(Ce).

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Депмайерит прозрачный, бесцветный, в крупных зернах имеет голубоватый оттенок. Черта белая, блеск стеклянный. В ультрафиолетовых и катодных лучах минерал не люминесцирует. Спайность совершенная по {100}, излом ступенчатый. Отметим, что депмайерит визуально схож с сопутствующим натролитом; различить их можно по углу между направлениями спайности: у нового минерала, как и других членов группы канкринита, он составляет 120° , а у натролита близок к 90° . Депмайерит хрупкий, твердость по шкале Мооса 5. Плотность, измеренная методом гидростатического взвешивания, составляет 2.32(1), вычисленная — 2.313 г/см^3 .

Новый минерал оптически одноосный, положительный, $n_o = 1.493(2)$, $n_e = 1.497(2)$. Под микроскопом он бесцветен и не плеохроирует.

Волновые числа полос поглощения в ИК-спектре депмайерита (рис. 1) следующие (см^{-1} ; подчеркнуты наиболее сильные полосы, сл — слабая полоса, пл — плечо): 3595,

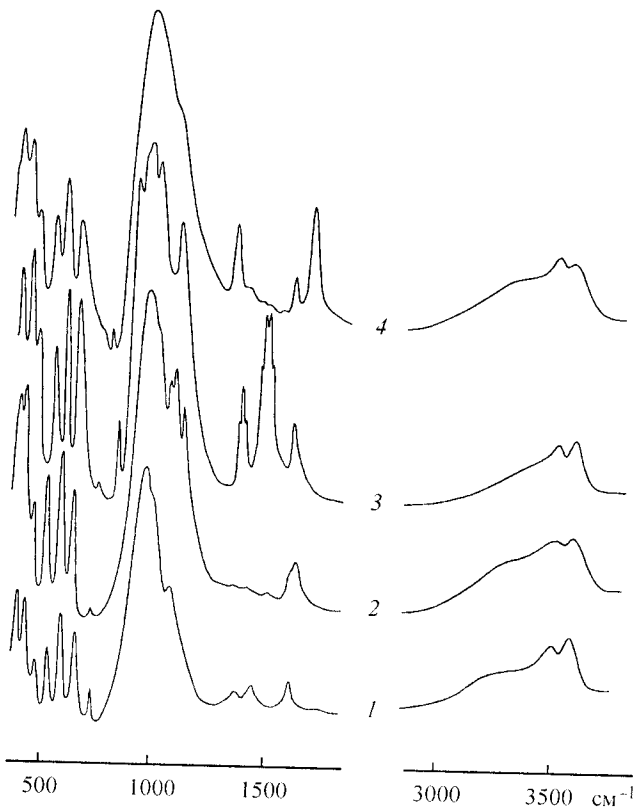


Рис. 1. ИК-спектры депмайерита (1), вшневиты (Вишневые горы, Ю. Урал) (2), канкринита (Вишневые горы) (3) и кваноксалита (гора Аллуайв, Ловозеро) (4).

Fig. 1. IR spectra of depmeierite (1); vishnevite (2) from Vishnevye Gory, the South Urals; cancrinite (3) from Vishnevye Gory; kyanoxalite (4) from the Alluiv Mt., Lovozero, Kola Peninsula.

3525сл (валентные колебания O—H молекул H₂O, образующих слабые водородные связи); 3350пл (валентные колебания O—H молекул H₂O, образующих сильные водородные связи); 1740сл (очень слабая полоса, не имеющая однозначного отнесения; возможно, это обертон), 1637сл (деформационные колебания молекул H₂O); 1478сл, 1392сл (валентные колебания C—O ионов CO₃²⁻) 1104, 1030пл, 990 (валентные колебания Si—O—Al и P—O); 758 (либрационные колебания H-связанных молекул H₂O); 683, 624, 567 (в основном деформационные колебания Al, Si, O-каркаса и ионов PO₄³⁻), 501, 458, 428 (деформационные колебания Si—O—Al).

В области 550—700 см⁻¹, отвечающей главным образом деформационным колебаниям (с небольшим вкладом валентных) Al, Si, O-каркаса, ИК-спектр депмайерита, как и всех прочих членов группы канкринита с каркасом типа AB, содержит группу из трех хорошо разрешенных полос (рис. 1). В качестве диагностического признака для минералов данного типа можно рассматривать положения двух крайних полос этого триплета: 567 и 683 см⁻¹ у депмайерита, 576 и 685 см⁻¹ у типичного канкринита, 570—573 и 685—687 см⁻¹ у кианоксалита, 576—578 и 693—700 см⁻¹ у канкрисилита, 556 и 669 см⁻¹ у давина, 563 и 677 см⁻¹ у баллираноита, 568—570 и 680 см⁻¹ у вишневица. По сравнению с канкринитом, у депмайерита в ИК-спектре намного слабее проявлены полосы, отвечающие колебаниям карбонатных групп (1478 и 1392 см⁻¹), и заметно сильнее выражена широкая полоса при 3350 см⁻¹, соответствующая колебаниям молекул H₂O, образующих сильные водородные связи.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Содержания в депмайерите элементов с атомными номерами выше, чем у кислорода; они определены электронно-зондовым методом на цифровом сканирующем электронном микроскопе CamScan MV2300, оснащенный YAG-детектором вторичных и отраженных электронов и энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором с полупроводниковым (Si-Li) детектором Link INCA Energy. Ускоряющее напряжение 15.7 кВ, ток зонда 0.5 нА. Анализ проводился в режиме сканирования по площади 16 × 16 мкм для минимизации эффекта миграции слабосвязанных компонентов, в первую очередь Na, в ходе анализа. Эталоны: альбит — Na; микроклин — K; FeS₂ — Fe, S; Al₂O₃ — Al; SiO₂ — Si; LaPO₄ — P.

Содержания H₂O и CO₂ определены с помощью селективной сорбции из газообразных продуктов прокалывания депмайерита при 1080 °С в токе кислорода. Опыт был комбинированным: улавливание H₂O осуществлялось поглотительными трубками, наполненными Mg(ClO₄)₂ (по методу Алимарина), а в качестве сорбента для CO₂ использован аскарит — асбест, насыщенный NaOH.

Средний по результатам 10 электронно-зондовых анализов (в скобках — разброс значений) химический состав депмайерита: Na₂O 23.04 (22.1—23.8), K₂O 0.54 (0.3—0.7), Fe₂O₃ 0.03 (0.00—0.1), Al₂O₃ 29.07 (27.9—30.1), SiO₂ 36.48 (35.1—37.5), P₂O₅ 3.30 (2.9—4.0), SO₃ 0.08 (0.00—0.2), CO₂ 0.97, H₂O 5.93; сумма 99.44 мас. %. Содержания Ca, Sr, Ba, Mg, Mn, As, V, F, Cl — ниже пределов обнаружения электронно-зондовым методом.

Эмпирическая формула, рассчитанная на (Si,Al)₁₂O₂₄, такова: (Na_{7.58}K_{0.12})_{Σ7.70}(Si_{6.19}·Al_{5.81}O₂₄)[(PO₄)_{0.47}(CO₃)_{0.22}(OH)_{0.02}(SO₄)_{0.01}]_{Σ0.72}·3.345H₂O; отношение OH/H₂O вычислено из условия баланса зарядов. Упрощенная формула Na₈[Al₆Si₆O₂₄]·(PO₄,CO₃)_{1-x}·3H₂O (x < 0.5).

Формула конечного члена депмайерита может быть представлена как Na₈[Al₆Si₆O₂₄](PO₄)_{2/3}·3H₂O. Отвечающие ей содержания компонентов: Na₂O 24.42, Al₂O₃ 30.13, SiO₂ 35.51, P₂O₅ 4.61, H₂O 5.33; сумма 100.00 мас. %.

Индекс сходимости состава и свойств, рассчитанный по уравнению Гладстона—Дейла, составляет -0.012 для измеренного значения плотности и -0.015 для вычисленного, т. е. *superior* в обоих случаях.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Рентгеновское исследование монокристалла депмайерита, включающее в себя получение набора рефлексов, на основании которого прямыми методами была расшифрована кристаллическая структура, выполнено на дифрактометре Xcalibur S CCD. Кристаллографические характеристики, данные монокристалльного эксперимента и параметры уточнения структуры приведены в табл. 1, а координаты и тепловые параметры атомов, кратность и заселенность позиций — в табл. 2.

По общему мотиву кристаллической структуры депмайерит (рис. 2, а) близок к канкриниту и другим членам группы, имеющим аналогичный тип элементарной ячейки (см.: Bonaccorsi, Merlini, 2005). Как и они, новый минерал обладает тетраэдрическим каркасом типа *AB*, в котором атомы Si и Al упорядочены. Это хорошо видно по разнице в длинах связей: в Si-тетраэдрах межатомные расстояния Si—O варьируют от 1.6107(10) до 1.6206(10) Å (ср. 1.614 Å), а в более крупных Al-тетраэдрах расстояния Al—O лежат в пределах от 1.7277(9) до 1.7449(11) Å (ср. 1.736 Å).

В структурах канкринитоподобных минералов с каркасами типа *AB* наблюдаются вытянутые вдоль оси *c* каналы двух типов: узкие, образованные цепочками так называемых канкринитовых полостей, и широкие, подобные каналам в цеолитах. В депмайерите узкие каналы вмещают цепочки $[\cdots\text{Na}\cdots\text{H}_2\text{O}\cdots]^\infty$, в которых атомы Na [Na(1) в табл. 2] находятся на оси 3-го порядка, а молекулы H₂O [OW(1) в табл. 2] сдвинуты с нее (рис. 2, б). Последняя особенность в целом характерна для минералов со структурным типом канкринита и может быть объяснена слабостью Н-связей, способствующих фиксации положения молекул H₂O (Пушаровский и др., 1989).

Широкие каналы содержат атомы Na [Na(2) в табл. 2], молекулы H₂O [OW(2) в табл. 2] и анионные группы — тетраэдрические PO₄³⁻ и треугольные CO₃²⁻ (рис. 2, в). Атомы P занимают две позиции, расположенные на оси 6₃. Позиция P(1) статистически заполнена атомами P и C (P/C отношение составляет 1.3), а в позиции P(2) находятся только атомы P. Обе эти позиции характеризуются частичной заселенностью (табл. 2). Атом C, находящийся в позиции P(1), оказывается немного смещенным из плоскости треугольника, образованного тремя координирующими его атомами кислорода [O(7) в табл. 2]. Расстояния P—O варьируют от 1.552(9) до 1.743 Å для P(1) и от 1.569(9) до 1.855 Å для P(2) [более короткие расстояния атомы P образуют с O(5), лежащими в основании обоих тетраэдров]. Межатомные расстояния C—O составляют 1.289(18) Å.

Таблица 1

**Кристаллографические характеристики,
данные монокристалльной рентгенометрии
и параметры уточнения структуры депмайерита**
**Crystallographic characters, data of the monocrystal experiment
and parameters of the depmeierite refinement**

Сингония, пространственная группа, <i>Z</i>	Гексагональная, <i>P</i> 6 ₃ , 1
Параметры элементарной ячейки, Å	<i>a</i> = 12.7345(2), <i>c</i> = 5.1798(1)
Объем элементарной ячейки <i>V</i> , Å ³	727.46(2)
ρ , мм ⁻¹	0.726
<i>F</i> ₀₀₀	4970
Излучение; λ , Å	MoK α ; 0.71073
Интервалы сканирования	$-20 \leq h \leq 20, -20 \leq k \leq 20, -8 \leq l \leq 89$
Общее число рефлексов	26 028
Число независимых рефлексов; <i>R</i> _{int}	2059; 0.0632
Число независимых рефлексов [<i>F</i> ₀ > 4σ(<i>F</i> ₀)]	1683
Число уточняемых параметров	89
<i>R</i> 1(<i>F</i>), w <i>R</i> 2 _{all} (<i>F</i> ²)	0.0362/0.0953
GoF	1.007
$\Delta\rho_{\text{макс}}/\Delta\rho_{\text{мин}}$, э/Å ³	0.644/−0.507

Координаты (x/a , y/b , z/c) и температурные параметры (U_{eq} , Å²) атомов, кратность (Q) и заселенность (s.o.f.) позиций в структуре депмейерита

Coordinates (x/a , y/b , z/c) and displacement parameters (U_{eq} , Å²) of atoms, site multiplicities (Q) and site occupancy factors (s.o.f.) for depmeierite structure

Атом	x/a	y/b	z/c	U_{eq}	Q	s.o.f.
Si	0.32996(2)	0.41374(2)	0.7500	0.00982(6)	6	1
Al	0.07608(2)	0.41475(3)	0.75026(11)	0.01020(7)	6	1
Na(1)	0.6667	0.3333	0.1212(4)	0.0311(4)	2	0.982(4)
Na(2)	0.13776(5)	0.27865(7)	0.28006(18)	0.0393(2)	6	0.980(2)
O(1)	0.20282(7)	0.40392(8)	0.6707(2)	0.0173(2)	6	1
O(2)	0.12146(8)	0.56699(7)	0.7284(3)	0.0250(2)	6	1
O(3)	0.02621(8)	0.35498(9)	0.05607(18)	0.0189(2)	6	1
O(4)	0.32260(8)	0.36329(9)	0.03864(19)	0.0191(2)	6	1
OW(1)	0.6921(5)	0.3812(4)	0.6860(11)	0.0559(15)	6	0.33
OW(2)	-0.0006(9)	0.1035(8)	0.5322*	0.061(2)**	6	0.20
P(1)	0.0000	0.0000	0.5348*	0.0480(14)**	2	0.23
P(2)	0.0000	0.0000	0.2295*	0.049(3)**	2	0.07
O(5)	0.0513(9)	0.1215(9)	0.8854*	0.077(3)**	6	0.20
O(6)	0.0000	0.0000	0.3714*	0.058(4)**	2	0.20
O(7)	0.0930(18)	0.1065(19)	0.5653*	0.071(5)**	6	0.10

Примечание. * — координата зафиксирована в ходе уточнения; ** — изотропная тепловая поправка (U_{iso}); Al = Al_{0.97}Si_{0.03}; P(1) = P_{0.13}C_{0.10}; O(1), O(2), O(3) и O(4) — атомы кислорода, координирующие Si и Al в каркасе; OW(1) — атомы кислорода молекул H₂O в узком канале; OW(2) — атомы кислорода молекул H₂O в широком канале; O(5) и O(6) — атомы кислорода тетраэдров PO₄; O(7) — атомы кислорода треугольных групп CO₃.

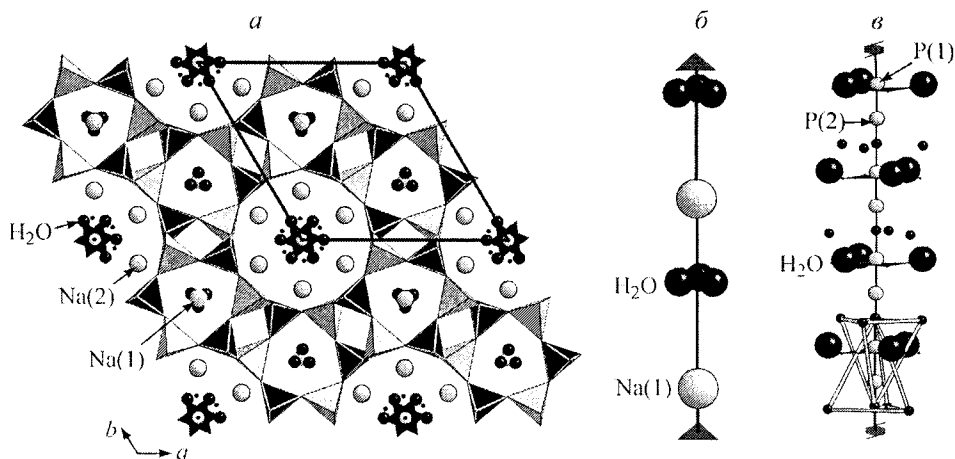


Рис. 2. Кристаллическая структура депмейерита.

a — общий вид: тетраэдры SiO₄ и треугольники CO₃ показаны черным цветом, тетраэдры AlO₄ — серым, светлыми шариками среднего размера обозначены позиции P, малыми черными шариками — атомы кислорода PO₄-тетраэдров, выделена элементарная ячейка; b — содержимое узкого канала; c — содержимое широкого канала, кроме атомов Na (малыми черными шариками показаны атомы кислорода PO₄-тетраэдров).

Fig. 2. Crystal structure of depmeierite: a — general view, with position of SiO₄ tetrahedra, CO₃ triangles (black), AlO₄ tetrahedra (gray), PO₄ tetrahedra, and shown unit cell; b — contents of the narrow channel; c — contents of the wide channel.

Результаты расчета рентгенограммы порошка депмайерита

X-ray powder diffraction data for depmeierite

$I_{\text{нзм}}$	$d_{\text{нзм}}, \text{Å}$	$I_{\text{выч}}$	$d_{\text{выч}}, \text{Å}$	hkl	$I_{\text{нзм}}$	$d_{\text{нзм}}, \text{Å}$	$I_{\text{выч}}$	$d_{\text{выч}}, \text{Å}$	hkl
30	6.380	61	6.367	110	6	1.707	3	1.706	103
3	5.519	2	5.514	200	2	1.681	1	1.679	502
91	4.695	81	4.688	101	5	1.673	7	1.671	521
19	4.167	14	4.168	210	7	1.648	3	1.648	203
1	4.022	1	4.018	111	3	1.644	4	1.642	332
1	3.779	2	3.775	201	4	1.600	4	1.600	611
37	3.681	55	3.676	300	14	1.597	14	1.595	123
100	3.250	100	3.247	211	7	1.593	11	1.592	440
1	3.062	1	3.059	130	4	1.577	2	1.575	700
2	3.002	3	2.998	301	2	1.571	1	1.573	512
33	2.758	39	2.757	400	2	1.531	1	1.529	260
10	2.637	17	2.634	311	7	1.509	10	1.507	701
31	2.596	27	2.590	002	4	1.505	4	1.504	133
8	2.526	4, 7	2.530, 2.521	320, 102	4	1.501	6	1.499	602
21	2.436	40	2.434	401	2	1.487	1	1.485	432
7	2.411	3	2.407	140	1	1.472	4	1.467	261
13	2.276	12	2.273	321	18	1.464	12, 6	1.463, 1.461	403, 170
7	2.185	9	2.182	141	2	1.427	5	1.426	233
24	2.121	14, 11	2.122, 2.117	330, 302	1	1.391	1	1.389	630
2	2.031	4	2.029	501	2	1.386	2	1.378	800
1	2.012	1	2.009	222	1	1.363	2	1.362	541
1	1.980	1	1.981	510	6	1.358	12	1.356	442
8	1.889	12	1.888	402	3	1.346	1, 3	1.347, 1.346	270, 532
2	1.853	4	1.850	151	9	1.333	14	1.332	801
11	1.811	5, 8	1.813, 1.810	340, 322	3	1.306	3	1.304	271
8	1.765	7, 8	1.766, 1.763	250, 412	4	1.303	4	1.302	153
2	1.713	5	1.711	431	2	1.297	3	1.295	004

Упрощенная до видообразующих компонентов структурная формула депмайерита — $[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}][\text{Na}_2(\text{H}_2\text{O})_2][\text{Na}_6(\text{PO}_4)_{2/3}(\text{H}_2\text{O})]$, где в квадратных скобках последовательно даны составы каркаса и содержимого узкого и широкого каналов.

Порошковая рентгенограмма депмайерита получена на дифрактометре STOE — STADI MP с изогнутым Ge (111) первичным монохроматором, обеспечивающем $\text{Cu}_{K\alpha 1}$ -излучение. В табл. 3 видно, что экспериментальная и вычисленная из структурных данных рентгенограммы нового минерала близки. Рассчитанные из порошкограммы параметры гексагональной ячейки: $a = 12.744(3)$, $c = 5.187(1) \text{ Å}$, $V = 729.4(6) \text{ Å}^3$. По рентгенограмме порошка депмайерит близок к канкриниту и другим членам группы с каркасами типа *AB*.

О ПОДГРУППЕ КАНКРИНИТА *SENSU STRICTO*

Одиннадцать из двадцати двух минералов группы канкринита характеризуются простейшим типом Al,Si,O-каркаса с последовательностью укладки тетраэдрических слоев *AB*, и соответственно минимальным из возможных параметров элементарной ячейки $c \approx 5.1—5.4 \text{ Å}$. Три из них имеют увеличенное по сравнению с минимальным (12.55—12.75 Å) значение параметра ячейки a , что обусловлено характером расположения содержимого широкого канала: квадридавин — 25.8, питильяноит и микросоммит — 22.1 Å (Bonaccorsi, Merlino, 2005). Остальные восемь минералов с этим типом

Сравнительная характеристика минералов подгруппы канкринита *sensu stricto* в группе канкринита
Comparative characteristics of cancrinite-group minerals belonging to the cancrinite *sensu stricto* subgroup

Характеристика	Канкринит	Вишневит	Канкрисилит	Гидроксиканкринит	Киапоксалит	Депмайерит
Формула	$(\text{Na}, \text{Ca})_{7-8}[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot (\text{CO}_3)_{1-2} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$(\text{Na}, \text{K})_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot (\text{SO}_4) \cdot 2-3\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_7[\text{Al}_5\text{Si}_7\text{O}_{24}] \cdot (\text{CO}_3) \cdot 2-3\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot (\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_7[\text{Al}_{5-6}\text{Si}_{6-7}\text{O}_{24}] \cdot (\text{C}_2\text{O}_4)_{0.5-1} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot (\text{PO}_4, \text{CO}_3)_{1-x} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Содержимое широкого канала	$(\text{Na}, \text{Ca})_{5-6}(\text{CO}_3)_{1-2}$	$(\text{Na}, \text{K})_6(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{0-1}$	$\text{Na}_5(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_{0-1}$	$\text{Na}_6(\text{OH})_2$	$\text{Na}_5(\text{C}_2\text{O}_4)_{0.5-1}(\text{H}_2\text{O})_3$	$\text{Na}_6(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_{1-x}(\text{H}_2\text{O})$
Сингония	Гексагональная	Гексагональная	Гексагональная	Тригональная	Гексагональная	Гексагональная
Простр. группа	$R\bar{6}_3$	$R\bar{6}_3$	$R\bar{6}_3mc$	$R\bar{3}$	$R\bar{6}_3$	$R\bar{6}_3$
Упорядоченность каркаса (Al—Si)	Упорядоченный	Упорядоченный	Разупорядоченный	Упорядоченный	Упорядоченный	Упорядоченный
<i>a</i> , Å	12.6—12.8	12.68	12.575	12.74	12.744	12.735
<i>c</i> , Å	5.1—5.2	5.18	5.105	5.183	5.213	5.180
<i>V</i> , Å ³	~720	722	699	728.5	733	727
<i>Z</i>	1	1	1	1	1	1
Оптические свойства						
<i>n_o</i>	1.507—1.528	1.489—1.502	1.509	1.494	1.494	1.493
<i>n_e</i>	1.495—1.503	1.488—1.495	1.490	1.501	1.491	1.497
оптический знак	—	—	—	+	—	+
Плотность, г/см ³	2.42—2.51	2.32—2.43	2.39 (выч.) 2.40 (изм.)	2.26 (выч.) 2.32 (изм.)	2.327 (выч.) 2.30 (изм.)	2.313 (выч.) 2.32 (изм.)
Место первой находки	Ильменские горы (Ю. Урал)	Вишневые и Ильменские горы (Ю. Урал)	Ловозерский массив (Кольский п-ов)	Ловозерский массив (Кольский п-ов)	Ловозерский массив (Кольский п-ов)	Ловозерский массив (Кольский п-ов)
Литературный источник	Минералы, 2003; наши данные	Минералы, 2003; Olysysh et al., 2008b	Хомяков и др., 1991; наши данные	Хомяков и др., 1992	Чуканов и др., 2009	Настоящая работа

Примечание. Полу жирным шрифтом выделен видообразующий внекаркасный анион.

каркаса могут быть подразделены по характеру содержимого узкого канала. Так, у давина $(\text{Na,K})_6\text{Ca}_2[\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24}]\text{Cl}_2(\text{SO}_4)$ и баллираноита $(\text{Na,K})_6\text{Ca}_2[\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24}]\text{Cl}_2(\text{CO}_3)$ здесь находятся цепочки $[\cdots\text{Ca}\cdots\text{Cl}\cdots]^\infty$, а у канкринита, вишневиты, канкрисилита, гидроксиканкринита, кианоксалита и депмайерита — цепочки $[\cdots\text{Na}\cdots\text{H}_2\text{O}\cdots]^\infty$. В обоих случаях общий заряд «начинки» узкого канала составляет 1+. Позиции молекул H_2O могут без нарушения баланса зарядов оказываться частично вакансионными. Как показывают наши данные, в природе существует и очень низководный канкринит, у которого содержимое узкого канала имеет состав $[\text{Na}_{1.90}(\text{H}_2\text{O})_{0.18}]$ на формулу вместо идеального $[\text{Na}_2(\text{H}_2\text{O})_2]$ (Chukanov et al., 2009).

Недавно мы обсуждали возможность выделения в группе канкринита подгруппы собственно канкринита (*sensu stricto*, *s. s.*), в которую предлагалось объединить минералы с последовательностью укладки тетраэдрических слоев в каркасе *AB* и минимальным по объему типом элементарной ячейки (Чуканов и др., 2009). В свете последних данных представляется более оправданным включить в подгруппу канкринита *s. s.* только минералы с цепочками $[\cdots\text{Na}\cdots\text{H}_2\text{O}\cdots]^\infty$ в узком канале. Это имеет, кроме чисто кристаллохимического, еще и генетический смысл: все шесть объединяемых в данную подгруппу минералов (табл. 4) приурочены к щелочным интрузивным комплексам, где они формируются в постмагматических образованиях широкого диапазона температур — пегматитах, гидротермалитах, метасоматитах (в том числе контактовых); канкринит и вишневит, кроме того, встречаются в магматических породах. Находки большинства из этих минералов в других геологических формациях неизвестны, лишь канкринит изредка отмечается в щелочных эффузивах, и то в основном в связи с их контактовыми образованиями (отметим, что в щелочных вулканитах района Айфель в Германии наиболее часто встречается упомянутый выше низководный канкринит). В то же время все прочие члены группы канкринита, включая давин, баллираноит, питильноит, микросоммит и квадридавин, обладающие тем же типом каркаса, что и представители подгруппы канкринита *s. s.*, но отличающиеся от них другими кристаллохимическими особенностями, характерны для иных геологических формаций. Большинство из них, кроме быстрита и тункита, связано с щелочными эффузивными комплексами, а некоторые встречаются в лазуритоносных метасоматитах (афганит, давин, тункит, быстрит).

Отметим, что первоначальными местонахождениями для всех шести членов подгруппы канкринита *s. s.* являются два щелочных интрузивных комплекса России — Ильмено-Вишневогорский на Южном Урале (канкринит, вишневит) и Ловозерский на Колском полуострове (канкрисилит, гидроксиканкринит, кианоксалит, депмайерит).

Как видно в табл. 4, члены подгруппы канкринита *s. s.* различаются между собой в основном содержимым широкого канала, и в первую очередь типом видообразующего дополнительного аниона. Канкрисилит выделяется среди них не только повышенным Si/Al отношением, но и, что более существенно, полной разупорядоченностью атомов Si и Al в каркасе (Хомяков и др., 1991; наши данные). Содержание H_2O в широком канале может варьировать от полного отсутствия (пример: типичный канкринит) до трех молекул на формулу (кианоксалит).

ФОСФОР В МИНЕРАЛАХ ГРУППЫ КАНКРИНИТА

Депмайерит — первый минерал группы канкринита с преобладающим фосфатным дополнительным анионом (отметим, что синтетические канкринитоподобные алюмосиликаты с группой PO_4 в качестве внекаркасного компонента неизвестны до сих пор). Более того, это единственный природный фельдшпатоид со столь высокозарядным (3-) дополнительным анионом. Такая особенность обуславливает общий дефицит в депмайерите внекаркасных анионов относительно большинства других членов подгруппы канкринита *s. s.* (кроме кианоксалита: табл. 4), в результате чего в широком канале остается свободное пространство, достаточное для размещения молекулы H_2O (в отличие от анион-насыщенных минералов, например канкринита).

Идеализированная формула чисто натриевого бескарбонатного конечного члена депмайерита имеет вид: $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{PO}_4)_{2/3} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Учитывая существование у наиболее сходного в структурном отношении с новым минералом вишневиты разновидности с содержанием около 1 сульфатной группы на формулу (Olysyuch et al., 2008b) и близость размеров тетраэдров PO_4 и SO_4 , можно допустить вхождение в депмайерит и большего, чем известно сегодня, количества фосфора. Компенсация избытка отрицательного заряда у этой гипотетической разновидности минерала могла бы осуществляться, например, через замещение части Na в широком канале на Ca, характерное для других представителей подгруппы канкринита *s. s.* Так, при вхождении 1 атома Ca на формулу количество PO_4 -групп могло бы тоже достигнуть 1: $\text{Na}_7\text{Ca}[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{PO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$; можно предположить, что величина *n* здесь окажется ближе к 2, чем к 3, в результате «вытеснения» воды из широкого канала при росте содержания фосфатного компонента.

О фосфоре в минералах группы канкринита не было практически никаких сведений до совсем недавнего времени. В литературе нам удалось обнаружить лишь одно указание: М. Д. Дорфман (1962) отметил 0.16 мас. % P_2O_5 в канкрините из пегматита ийолит-уртитов на горе Юкспор в Хибинском массиве (Кольский п-ов).

Наши исследования показали, что фосфор в целом типичен для минералов подгруппы канкринита *s. s.* из Ловозера. Вторым после депмайерита по содержанию этого компонента здесь оказался кианоксалит, в котором концентрация P_2O_5 достигает 2.2 мас. %, что соответствует 0.30 атома P на формулу. Примесь P_2O_5 в количествах от 0.2 до 1.1 мас. % в целом характерна для кианоксалита и промежуточных членов ряда канкринит—кианоксалит из этого массива, хотя встречаются и бесфосфорные образцы. В ловозерском канкрисилите установлено до 0.6 мас. % P_2O_5 (0.09 атома P на формулу).

Обнаруживается примесный фосфор и в составе других членов группы из объектов разных генетических типов. Так, до 0.5 мас. % P_2O_5 зафиксировано нами в канкрините из зоны контакта ийолита с кальцитовым карбонатитом на Железородном месторождении в Ковдорском массиве (Кольский п-ов) и из миаскит-пегматита копи 114 в Ильменских горах, до 0.4 % — в вишневите из миаскит-пегматитов Курочкина лога в Вишневых горах, до 1.1 % — в лиоттите из щелочных вулканитов кальдеры Сакрофано (Лацио, Италия). Примесь P_2O_5 в количестве 0.2—0.3 мас. % оказалась характерной для канкринита целого ряда щелочных интрузивных комплексов, в первую очередь миаскитовых. Это, помимо Ильменских и Вишневых гор, где фосфор обнаружен во многих образцах, Дахуунур (Тыва), Мариупольский массив (Украина), Дарай-Пиоз, Тутек, Шахи-Сафет (Таджикистан), Рохшиф-Сабах (Кыргызстан), Лангезунд-фьорд, Мёрье (Норвегия), Банкрофт (Канада).

Отсутствие в литературе информации о содержании фосфора в составе минералов группы канкринита связано и с тем, что они, скорее всего, в большинстве случаев просто не анализировались на этот элемент. Обнаружение депмайерита и P-содержащих разновидностей других членов группы канкринита показало, что при изучении химического состава фельдшпатоидов с дополнительными анионами следует включать в список определяемых компонентов и фосфор.

ОБ УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕПМАЙЕРИТА И ДРУГИХ НЕКАРБОНАТНЫХ ЧЛЕНОВ ПОДГРУППЫ КАНКРИНИТА *SENSU STRICTO*

Депмайерит и натролит в описанном выше прожилке кристаллизовались одновременно: между ними наблюдаются индукционные поверхности совместного роста. Это свидетельствует о том, что новый минерал имеет гидротермальное происхождение и образовался при температуре не выше 250—300 °С (см.: Пеков и др., 2004). Присутствие вуоннемита и витусита — индикаторов ультрагиперитовых условий (Хомяков, 1990) — говорит об очень высокой щелочности гидротермальных растворов, которая, судя по набору минералов этого прожилка, имела ярко выраженный натриевый характер.

Формирование депмайерита вместо обычного в подобных натролитовых прожилках канкрисилита $\text{Na}_7[\text{Al}_5\text{Si}_7\text{O}_{24}](\text{CO}_3) \cdot 2—3\text{H}_2\text{O}$ (Пеков, 2000) стало возможным, оче-

видно, благодаря обогащению гидротермального раствора фосфора при дефиците углекислоты. Концентрация фосфат-ионов в среде его образования, несомненно, была высокой: с депмайритом тесно ассоциируют и другие фосфатосиликаты — стенструпин-(Се) и вуоннемит, присутствует фосфат витусит-(Се). Дефицит же CO_2 в целом характерен для Ловозерского массива, что особенно хорошо видно при его сопоставлении с соседним Хибинским щелочным массивом, где широко распространена эндогенная содовая и другая карбонатная минерализация (Хомяков, 1990), тогда как в Ловозере, несмотря на более высокое общее содержание Na, гипогенные содовые минералы (как и прочие карбонаты) редки. Мы связываем это различие с существенно более восстановительными условиями минералообразования, особенно на постмагматическом этапе, в Ловозерском массиве по сравнению с Хибинским, на что указывает и характер органических веществ в их пегматитах и гидротермалитах: в Хибинах распространены окисленные органические соединения — с гидроксильными, карбонильными, карбоксильными и карбоксилатными группами, тогда как в Ловозере битуминозные вещества обладают повышенными содержаниями алифатических углеводородов и обеднены кислородом (Чуканов и др., 2006). Вероятные причины таких различий обсуждаются в работе В. Н. Ермолаевой и соавторов (2008).

Минералы подгруппы канкринита *s. s.*, как оказалось, чутко реагируют на активность углекислоты в постмагматических образованиях интрузивных массивов, что можно проиллюстрировать тоже сравнением Хибинского и Ловозерского массивов. В Хибинах очень широко развиты карбонатные члены подгруппы (при резком преобладании канкринита), тогда как распространение прочих ее минералов ограничивается находками микроколичеств высококальциевого вишневиты в составе позднегидротермальных парагенезисов двух ультраагпаитовых пегматитов на горах Кукисвумчорр и Коашва (Olysysh et al., 2008a, b). В Ловозере, наоборот, карбонатные представители мало распространены и представлены в основном канкрисилитом, содержащим меньше CO_3 -групп на формулу, чем канкринит (Хомяков и др., 1991), тогда как вишневит играет роль породообразующего минерала (Рекон, 2000), как и недавно установленный оксалатный член группы — кианоксалит (Чуканов и др., 2009). Канкрисилит и кианоксалит, как правило, кристаллизуются на более поздних стадиях, чем вишневит. В число некарбонатных представителей этой группы в Ловозере входят еще два редких минерала — гидроксиканкринит (Хомяков и др., 1992) и депмайрит. Таким образом, здесь установлены все шесть членов подгруппы канкринита *s. s.*, причем канкринит, наиболее типичный для других щелочных комплексов, в Ловозере достаточно редок и, как показывают наши данные, представлен необычной очень низкокальциевой оксалатсодержащей разновидностью.

Из сказанного можно заключить, что члены подгруппы канкринита *s. s.* в дифференциатах щелочных интрузивных комплексов обладают сильным сродством к внекаркастному аниону CO_3^{2-} . Вероятно, только при его относительном дефиците реализуются минералы с другими анионными группами в широком канале — SO_4^{2-} , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, PO_4^{3-} в зависимости от того, каким из них более обогащена минералообразующая среда. Появление гидроксиканкринита с OH^- в этом качестве, видимо, возможно только тогда, когда она обеднена одновременно всеми этими анионами, а редкость данного минерала связана, скорее всего, еще и с тем, что он «вынужден конкурировать» с имеющимися широкие поля устойчивыми натриевыми алюмосиликатами без дополнительных анионов — цеолитами, альбитом, нефелином.

Также отметим, что все минералы подгруппы канкринита *s. s.*, кроме собственно канкринита, являются очень низкокальциевыми. Однозначно установлено, что для вишневиты эта особенность обусловлена внутренними, кристаллохимическими причинами: в Вишневых горах нами обнаружен парагенезис обогащенного Ca (и бедного K) канкринита с вишневитом, который, наоборот, богат K и практически не содержит Ca (Olysysh et al., 2008b). Для прочих минералов эта закономерность пока остается на уровне эмпирической.

Таким образом, для формирования некарбонатных и низкокарбонатных представителей подгруппы канкринита *s. s.* наиболее благоприятными оказались условия (в

первую очередь, вероятно, в части химизма среды), имевшие место на поздне- и особенно на постмагматических стадиях эволюции Ловозерского массива: очень высокая активность Na и дефицит CO₂, причем обусловленный не общей обедненностью углеродом, а восстановительным характером минералообразующих систем. Последняя особенность ярко подчеркивается широким распространением здесь оксалатсодержащих членов подгруппы — кианоксалита и промежуточных членов ряда канкринит—кианоксалит.

Авторы благодарны Л. А. Коршуновой за определение содержаний CO₂ и H₂O в новом минерале. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 08-07-00077-а и 09-05-00143-а, а также грантов президента РФ МК-320.2010.5, НЦ-4034.2010.5, НШ-3848.2010.5.

Список литературы

- Буссен И. В., Сахаров А. С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Л.: Наука, 1972. 296 с.
- Дорфман М. Д. Минералогия пегматитов и зон выветривания в ийолит-уртитях горы Юкспор Хибинского массива. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 26—32.
- Ермолаева В. Н., Чуканов Н. В., Пеков И. В., Козарко Л. Н. Геохимическая и генетическая роль органических веществ в постмагматических дифференциатах щелочных массивов // ЗРМО. 2008. № 5. С. 17—33.
- Минералы. Справочник. Т. V: Каркасные силикаты. Вып. 2: Фельдшпатоиды. М.: Наука, 2003. 380 с.
- Пеков И. В., Турчкова А. Г., Ловская Е. В., Чуканов Н. В. Цеолиты щелочных массивов. М.: Экост, 2004. 168 с.
- Пуцаровский Д. Ю., Ямнова Н. А., Хомяков А. П. Кристаллическая структура высококалиевого вишнепита // Кристаллография. 1989. Т. 34. В. 1. С. 67—70.
- Хомяков А. П. Минералогия ультраапатитовых щелочных пород. М.: Наука, 1990. 196 с.
- Хомяков А. П., Семенов Е. И., Победимская Е. А., Надеждина Т. Н., Расцветаева Р. К. Канкринит Na₇[Al₃Si₇O₂₄]CO₃·3H₂O — новый минерал семейства канкринита // ЗВМО. 1991. Вып. 6. С. 80—84.
- Хомяков А. П., Надеждина Т. Н., Расцветаева Р. К., Победимская Е. А. Гидроксиканкринит Na₈[Al₆Si₆O₂₄](OH)₂·2H₂O — новый минерал // ЗВМО. 1992. № 1. С. 100—105.
- Чуканов Н. В., Пеков И. В., Соколов С. В., Некрасов А. Н., Чуканова В. Н., Наумова И. С. К вопросу об образовании и геохимической роли битуминозных веществ в пегматитах Хибинского и Ловозерского щелочных массивов (Кольский полуостров, Россия) // Геохимия. 2006. № 7. С. 774—789.
- Чуканов Н. В., Пеков И. В., Олысыч Л. В., Масса В., Якубович О. В., Задов А. Е., Расцветаева Р. К., Вигасина М. Ф. Кианоксалит — новый минерал группы канкринита с оксалатным внекаркасным анионом из Ловозерского щелочного массива (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2009. № 6. С. 18—35.
- Bonaccorsi E., Merlino S. Modular microporous minerals. Cancrinite-Davyne Group and C—S—H Phases // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2005. Vol. 57. P. 241—290.
- Chukanov N. V., Zubkova N. V., Pekov I. V., Olysysh L. V. Unusual H₂O-poor cancrinite from Laacher Sea, Eifel, Germany, and its crystal structure // Int. Symposium «Minerale der Sodalithund Cancrinit-Gruppen sowie verwandte synthetische Verbindungen: Strukturelle Komplexitaet und Variabilitaet, sowie ihre Beziehung zum Eifelvulkanismus». Kiel, 2009. P. 11.
- Chukanov N. V., Zubkova N. V., Pekov I. V., Olysysh L. V., Bonaccorsi E., Pushcharovsky D. Yu. Balliranoite, (Na,K)₆Ca₂(Si₆Al₆O₂₄)Cl₂(CO₃), a new cancrinite-group mineral from Monte Somma, Vesuvius volcano complex, Italy // Eur. J. Miner. 2010. Vol. 22. (в печати).
- Olysysh L. V., Pekov I. V., Agakhanov A. A. Chemistry of cancrinite-group minerals from the Khibiny-Lovozero alkaline complex, Kola Peninsula, Russia // Minerals as Advanced Materials I. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008a. P. 91—94.
- Olysysh L., Pekov I., Chukanov N., Vigasina M. Varieties and formula of vishnevit // 6th International Conference «Mineralogy and Museums». Golden, 2008b. P. 65.
- Pekov I. V. Lovozero Massif: History, Pegmatites, Minerals. Moscow: OP, 2000. 480 p.

Поступила в редакцию
26 февраля 2010 г.