

Center for Research Libraries
GLOBAL RESOURCES NETWORK

ILLiad TN: 360101



Borrower: RAPID:AZU

Lending String:
Patron:

Journal Title: Zapiski Vserossiiskogo
mineralogicheskogo obshchestva / Rossiiskaya
akademiiia nauk

Volume: 136

Issue: 2

Month/Year: 2007 Pages: 25-39

Article Author: Pekov I V, Chukanov N V,
Zadov A E, Zubkova N V, P

Article Title: Chesnokovite,
 $\text{Na}_2[\text{SiO}_2(\text{OH})_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, the first natural sodium
orthosilicate from the Lovozero alkaline massif,
Kola Peninsula, Russia: description and crystal
structure of a new mineral, abstract only

Imprint:

ILL Number: -12729305



Call #: C-38518
Location: crls
OCLC#: 26751281
ISSN#: 0869-6055

Mail:
Charge
Maxcost:

Shipping Address:
NEW: Main Library

Fax:
Ariel: 129.82.28.195
Odyssey: 150.135.238.6

Transaction Date: 1/16/2018 9:17:13 AM

ARIEL

© Д. чл. И. В. ПЕКОВ, * д. чл. Н. В. ЧУКАНОВ, ** А. Е. ЗАДОВ, *** Н. В. ЗУБКОВА, *
д. чл. Д. Ю. ПУЩАРОВСКИЙ*

ЧЕСНОКОВИТ $\text{Na}_2[\text{SiO}_2(\text{OH})_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, ПЕРВЫЙ ПРИРОДНЫЙ ОРТОСИЛИКАТ НАТРИЯ — НОВЫЙ МИНЕРАЛ ИЗ ЛОВОЗЕРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ) И ЕГО КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА¹

I. V. PEKOV, N. V. CHUKANOV, A. E. ZADOV, N. V. ZUBKOVA, D. Yu. PUSHCHAROVSKY.
CHESNOKOVITE, $\text{Na}_2[\text{SiO}_2(\text{OH})_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, THE FIRST NATURAL SODIUM ORTHOSILICATE
FROM THE LOVOZERO ALKALINE MASSIF, KOLA PENINSULA, RUSSIA:
DESCRIPTION AND CRYSTAL STRUCTURE OF A NEW MINERAL

* Московский университет, геологический факультет, 119899, Москва, Воробьевы горы

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

*** НПО «Регенератор», 127018, Москва, 3-й Проезд Марьиной Рощи, 40

Chesnokovite, as a new mineral, is the first natural sodium orthosilicate, it has been found in an ussingite vein uncovered by underground mine at Kedykverpakh Mt, Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula, Russia. It is associated with natrolite, sodalite, vuonnemite, steenstrupine-(Ce), phosinate-(Ce), natisite, gobbinsite, viliaumite, natrosilite, revidite, etc. and forms intergrowths with natrophosphate. It occurs as nests, up to $4 \times 6 \times 10$ cm in size, consisting of chaotic aggregates of coarse lamellar crystals (up to $0.05 \times 1 \times 2$ cm) flattened on [010]. Crystals are transparent colorless, aggregates are white to pale brownish-yellowish, streak white, luster vitreous. Cleavage (010) perfect, (100) and (001) distinct, fracture stepped. Mohs' hardness 2.5, D (meas.) 1.68, D (calc.) for the empirical formula is 1.60, D (calc.) for the idealized formula — 1.64 g/cm³. Optically biaxial (+), $\alpha = 1.449$, $\beta = 1.453$, $\gamma = 1.458$, $2V$ (meas) = 80°. Orientation: $Z = b$. IR spectrum is given. Chemical composition (wt %; Si by electron probe, Na, K, Li by atom emission analysis, H_2O by Alimarin method): Na_2O 21.49, K_2O 0.38, Li_2O 0.003, SiO_2 21.42, H_2O 54.86, total 98.153. The empirical formula calculated on $\text{O}_2(\text{OH})_2$ is: $(\text{Na}_{1.96}\text{K}_{0.02})_{\Sigma 1.98}\text{Si}_{1.005}\text{O}_2(\text{OH})_2 \cdot 7.58\text{H}_2\text{O}$. The idealized formula ($Z = 8$) is: $\text{Na}_2[\text{SiO}_2(\text{OH})_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Orthorhombic, *Ibca*. The unit cell dimensions are: $a = 11.7119$, $b = 16.973$, $c = 11.5652$ Å, $V = 2299.0$ Å³. The strongest reflections of X-ray powder diagram (d , Å— $l-hkl$) are: 5.001—30 [211], 4.788—42 [022], 3.847—89 [231], 2.932—42 [400], 2.832—35 [060], 2.800—97 [332, 233], 2.774—100 [341, 143, 114]. The crystal structure was studied by the Rietveld method, $R_p = 5.77$, $R_{wp} = 7.77$, $R_B = 2.07$, $R_F = 1.74$. The structure is formed by isolated $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]$ tetrahedra and chains of edge-connected octahedra $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_6]$. Si and Na polyhedra are bonded only by H-bonds, which cause low stability of chesnokovite under atmospheric conditions. The mineral is named in the memory of B. V. Chesnokov (1928—2005), an outstanding Russian mineralogist. Type specimen is deposited in Fersman Mineralogical Museum of Russian Academy of Sciences, Moscow.

Введение. Среди природных силикатов выделяется специфическое семейство минералов, содержащих в качестве видообразующих компонентов только Na, Si, O и H. До настоящего времени их было известно шесть: магадиит $\text{NaSi}_7\text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, кенияит $\text{Na}_2\text{Si}_{22}\text{O}_{41}(\text{OH})_8 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, макатит $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_8(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, канемит $\text{NaHSi}_2\text{O}_4(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ревдит $\text{Na}_{16}[\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_5][\text{Si}_8\text{O}_{15}(\text{OH})_6](\text{OH})_{10} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ и груманит $\text{NaSi}_2\text{O}_4(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$. Несмотря на большое разнообразие синтетических водных силикатов натрия, природные представители этого семейства стали известны лишь 40 лет назад, после открытия в содоносных осадках озера Магади в Кении магадиита и кенияита (Eugster, 1967). Через несколько лет к ним добавились макатит и канемит, также описанные в отложениях содовых озер Африки (Sheppard e. a., 1970; Johan, Maglione, 1972), а другие находки в сходных условиях показали, что водные силикаты Na весьма характерны для щелочно-карбонатных формаций гипергенного, в первую очередь вулканогенно-осадочного, происхождения. Позже члены этого семейства обнаружились в совершенно иной обстановке — в составе «солевой» минера-

¹ Рассмотрено и рекомендовано Комиссией по новым минералам и названиям минералов РМО 12 января 2006 г. Утверждено Комиссией по новым минералам и названиям минералов ММА 30 апреля 2006 г. (IMA N 2006-007).

лизации поздних низкотемпературных дериватов высокощелочных магматических пород: в Ловозерском щелочном массиве на Кольском полуострове (Россия) был найден макатит и описаны новые минералы ревдит и грумантиит (Хомяков и др., 1980а, 1980б, 1987). На сегодня находки водных силикатов Na известны и в других щелочных комплексах мира: это Хибины на Кольском полуострове, Сент-Илер и Сент-Амабль в Квебеке (Канада), Арис в Намибии и др. Кроме кенияита, все члены этого семейства установлены в агпайтовых массивах, а наиболее распространены и разнообразны они в Ловозере. Здесь встречаются макатит, канемит, ревдит и грумантиит, которые замещают неустойчивый в позднегидротермальных и гипергенных условиях безводный натросилит $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ или же формируют самостоятельные выделения в кавернах и трещинах пород, пегматитовых и гидротермальных тел (Хомяков, 1990; Пеков, 2001).

В настоящей статье описывается новый минерал, первый природный ортосиликат натрия. Он установлен нами в гидротермалах Ловозерского массива и получил название **чесноковит** в память о Борисе Валентиновиче Чеснокове (1928—2005), выдающемся российском минералоге, работавшем в Институте минералогии Уральского отделения РАН в г. Миассе Челябинской области. Б. В. Чесноков — ученый с мировым именем и очень широкими интересами, внесший большой вклад в теорию минералогии, онтогенезу минералов, минералогию рудных месторождений, гранитных пегматитов, метаморфитов, а в последние десятилетия активно развивавший минералогию техногенных образований. Одним из объектов его исследований были поздние дифференциаты щелочных пород, главным образом Ильмено-Вишневогорской сне-нит-миаскитовой провинции Южного Урала. В частности, впервые для щелочных массивов Б. В. Чесноковым с соавторами (1982) описан сульфатный тип «солевой» минерализации.

Эталонные образцы чесноковита переданы в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве (регистрационный номер 3419/1).

Условия нахождения и общая характеристика. Образцы с будущим новым минералом были отобраны в сентябре 2005 г. одним из авторов (И. В. П.) и В. В. Левицким из свежевскрытой части жилы Кедыкверпахк-22 (нумерация жил продолжает начатую в работе: Пеков, 2001) в одной из подземных выработок на горе Кедыкверпахк (участок Кедыкверпахк рудника Карнасурт) в северо-западной части Ловозерского массива.

В ходе подземных работ на горе Кедыкверпахк вскрыто жильное поле, объединяющее более 30 ультращелочных тел, обладающих целым набором индивидуальных геологических, геохимических и минералогических черт и принципиально отличных по механизму формирования от «нормальных» пегматитов, которые тоже встречаются здесь. Более подробная характеристика этих жил приведена в отдельной публикации (Пеков, 2006). Они выполняют несколько систем субвертикальных трещин, чаще всего СЗ или ССЗ простирания, и тянутся на сотни метров при мощности 1—15 см. Жилы секут горизонт богатого лопаритом малиньита (так называемый пласт II-4) и вышележащий фойяит или уртит. Не более чем в полуметре под малиньитовым горизонтом, а иногда еще внутри него они выклиниваются книзу. Главные жилообразующие минералы — уссингит и/или натролит. Для этих тел характерны четкие признаки кристаллизации в свободном пространстве трещин: рост минеральных индивидов от зальбандов к центру, явления геометрического отбора в краевых частях жил, цепочки остаточных полостей в их осевой зоне.

В рассматриваемом жильном комплексе установлено почти 70 минеральных видов (Пеков, 2006). Практически все эти минералы содержат в качестве видеообразующего компонента натрий, подчас в очень большом количестве (> 15 — 20 мас. %), и в целом для жил характерна гипернатриевая специфика: величина Na/K отношения в них в отличие от ловозерских пегматитов составляет $n \cdot 10^3$ — $n \cdot 10^4$. Также в отличие от пегматитов в описываемых жилах полностью отсутствуют нефелин, ранние генерации полевых шпатов (микроклин и альбит здесь поздние и находятся в ничтожных количествах) и амфиболов, практически нет минералов циркония, очень мало эгирина,

зато широко развиты OH- и особенно H₂O-содержащие минералы. Обилие натролита говорит о гидротермальной природе описываемых жил. В отличие от пегматитов они представляются производными геохимически открытой системы — результатом кристаллизации из ультранатриевого флюида (раствора), активно реагировавшего с окружающими породами. Появление этого флюида, вероятно, обусловлено стягиванием компонентов (в первую очередь наиболее подвижных H₂O, Na и F) из микропор пород в зону пониженного давления — полость открывающейся трещины (Пеков, 2006).

Жила Кедыкверпахк-22 — типичный представитель этих образований. Она имеет мощность 6—8 см, а по простиранию прослежена более чем на 500 м. В ней чередуются натролитовые и существенно уссингитовые (с подчиненным натролитом) участки протяженностью по несколько метров. Чесноковит обнаружен в одном из уссингитовых участков жилы, там, где она сечет уртит над горизонтом лопаритового малиньита.

Помимо уссингита ранними минералами жилы здесь являются натролит, содалит, вуоннемит, стенструпин-(Ce), фосинант-(Ce), серандит и натисит. Пять последних минералов находятся в призальбандовых частях. К многочисленным линзовидным полостям, развитым в осевой зоне жилы и инкрустированным кристаллами уссингита, приурочен комплекс более поздних минералов, среди которых по массе преобладают «солевые». В составе этой «солевой» минерализации в свою очередь можно выделить продукты двух подстадий, кристаллизовавшиеся в разное время и явно при разных температурах. В более раннюю подстадию сформировались безводные «солевые» минералы: виллиомит NaF, натросилит Na₂Si₂O₅ и в незначительных количествах олимпийт Na₅Li(PO₄)₂ и сидоренкит Na₃Mn(PO₄)(CO₃); видимо, с этой же предельно щелочной стадией связано частичное замещение фосинанта-(Ce) витуситом-(Ce). Наконец, на позднегидротермальной подстадии возникла ассоциация «солевых» минералов, сильно обогащенных водой: ревдит (частичные и полные псевдоморфозы по натросилиту, реже — самостоятельные обособления), чесноковит Na₂[SiO₂(OH)₂] · 8H₂O и натрофосфат Na₇(PO₄)₂F · 19H₂O; вероятно, к продуктам этой подстадии относится и сильно Al, Si-разупорядоченная, судя по ИК-спектру, разновидность щелочного цеолита гоббинсита (Na,K)₅[Al₅Si₁₁O₃₂] · 12H₂O.

Чесноковит образует гнезда до 4 × 6 × 10 см, нацело заполняющие полости (рис. 1). Некоторые из них практически мономинеральные, в других наблюдаются

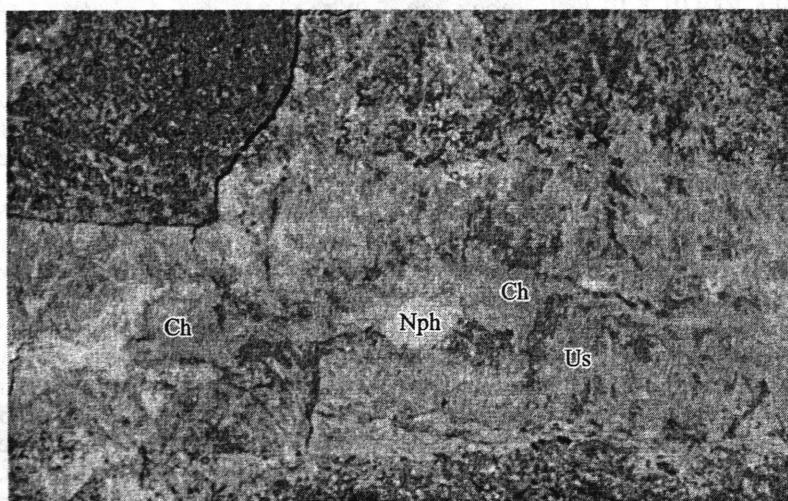


Рис. 1. Гнезда чесноковита (Ch) с натрофосфатом (Nph) в уссингите (Us).

Жила Кедыкверпахк-22, секущая уртит, в коренном залегании. Ширина поля зрения 23 см. Фото И. В. Пекова.

Fig. 1. Nests of chesnokovite (Ch) with natrophosphate (Nph) in ussingite (Us). The Kedykverpakhk-22 vein, cross-cutting urtite, *in situ*. Width of the field of view is 23 cm. Photo by I. V. Pekov.

включения натрофосфата. Скопления чесноковита сложены хаотическими агрегатами его плохо образованных пластинчатых кристаллов, уплощенных по {010} и обычно в той или иной мере расщепленных. Их главная форма — пинакоид {010}, боковые грани не выражены. Двойникования не наблюдалось. Размер индивидов нового минерала варьирует от нескольких микрон до $0.05 \times 1 \times 2$ см.

Добавим, что гнезда водного силиката Na, визуально неотличимые от наблюдавшихся в жиле Кедыкверпахк-22, были встречены одним из авторов (И. В. П.) в 1993 г. в двух других уссингитовых жилах, вскрытых подземными выработками на горе Кедыкверпахк. Судя по характеру изменений (см. ниже), происшедших с собранными тогда образцами, эти гнезда, скорее всего, состояли из чесноковита.

Физические свойства и оптическая характеристика. Кристаллы чесноковита бесцветные прозрачные, а агрегаты белые или светло-коричневато-желтоватые полу-прозрачные. Чешуя белая, блеск тусклый стеклянный. В ультрафиолетовых лучах минерал не люминесцирует. Чесноковит хрупкий, имеет спайность в трех взаимно перпендикулярных направлениях: совершенную по {010} и среднюю по {100} и {001}. Излом ступенчатый, а на поперечных сколах толстых пластин раковистый. Твердость по Моосу 2.5. Плотность, измеренная методом уравновешивания в тяжелых жидкостях, составляет 1.68 (2), рассчитанная для эмпирической формулы — 1.60, а для идеализированной — 1.64 г/см³.

Новый минерал оптически двуосный, положительный, $N_p = 1.449$ (2), $N_m = 1.453$ (2), $N_g = 1.458$ (3), $2V_{изм} = 80$ (5)°, $2V_{выч} = 84$ °. Дисперсия оптических осей не наблюдалась. Под микроскопом чесноковит бесцветный, не плеохроирует. Погасание прямое относительно направлений спайности. В плоскости совершенной спайности {010} лежит сечение оптической индикатрисы XY; соответственно Z = b.

Величина индекса сходимости состава и свойств по Гладстону—Дейлу (Mandarino, 1981) составляет 0.029 (excellent) для измеренной плотности, -0.021 (excellent) — для значения плотности, вычисленного из эмпирической формулы, и 0.005 (superior) — для значения плотности, вычисленного из идеализированной формулы.

ИК-спектроскопия. Инфракрасный спектр чесноковита (рис. 2) получен с использованием стандартной методики таблетирования с КBr на двухлучевом спектрофотометре Specord 75 IR. Спектр таблетки чистого КBr вычитался в ходе записи в автоматическом режиме. Контрольным опытом (съемка спектра суспензии чесноковита в вазелиновом масле в диапазоне 300—400 см⁻¹) было подтверждено, что образец не подвергается дегидратации при быстром перетирании с КBr.

ИК-спектр чесноковита характеризуется присутствием очень сильных полос валентных (диапазон 3200—3700 см⁻¹) и деформационных (1580—1680 см⁻¹) колебаний молекул воды, образующих водородные связи разной силы. Полосы в диапазоне 2200—3200 см⁻¹ отвечают валентным колебаниям слабокислотных гидроксильных групп (группы Si—OH).

Природа слабой полосы при 1450 см⁻¹ неясна: она может относиться как к незначительной примеси карбоната (новообразованного? не более 1 об. %, учитывая высокий коэффициент экстинкции таких полос), так и к изолированным катионам H⁺, донором которых могут быть кислотные группы Si—OH.

Максимумы поглощения в интервалах 400—510 и 850—930 см⁻¹ связаны с колебаниями изолированных кремнекислородных тетраэдров. Нетипичные для ортосиликатов, не имеющих протонированных кремниевых тетраэдров, сильные полосы в диапазоне 1000—1200 см⁻¹ (максимумы поглощения 1010, 1027 и 1171 см⁻¹) с наибольшей вероятностью связаны с группами Si—OH. Это предположение подтверждается тем фактом, что в ИК-спектре супулнита $\text{Ca}_2[\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2] \cdot \text{H}_2\text{O}$ — диортосиликата, в котором две из шести немостиковых вершин кремниевой диортогруппы представлены гидроксил-ионами, присутствуют сильные полосы при 1042 и 1191 см⁻¹.

ИК-спектр синтетического $\text{Na}_2[\text{SiO}_2(\text{OH})_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, полученный в аналогичных условиях, содержит тот же набор полос, что и спектр чесноковита, но отличается худшим разрешением: максимумы поглощения в нем наблюдаются на фоне широких диффузных полос слабораскристаллизованной составляющей (рис. 2).

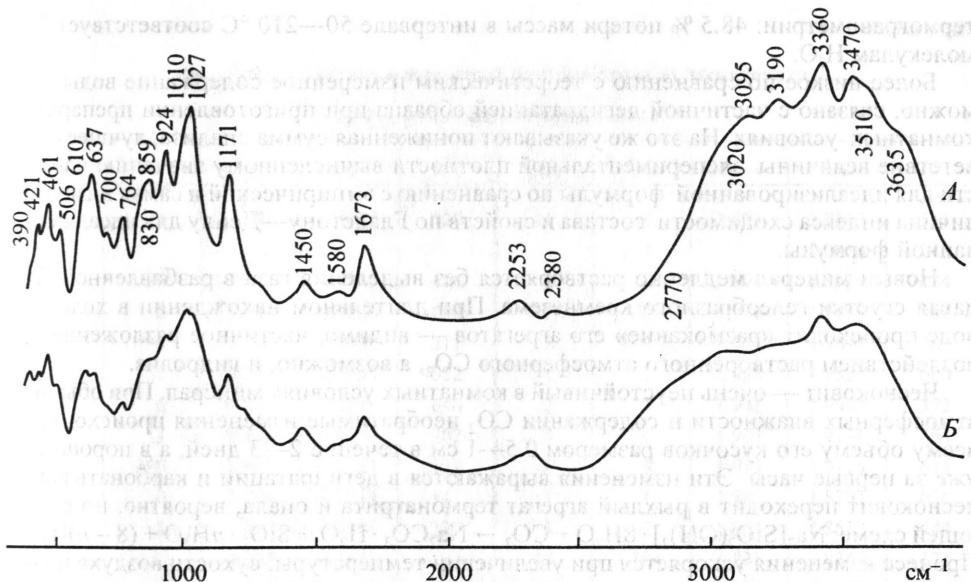


Рис. 2. ИК-спектры чесноковита (A) и его синтетического аналога (B).

Fig. 2. IR spectra of chesnokovite (A) and its synthetic analogue (B).

ИК-спектр чесноковита очень сильно отличается от спектров других минералов, в том числе водных силикатов натрия, и может служить надежной диагностической характеристикой.

Химический состав и химические свойства. Исследование химического состава чесноковита электронно-зондовым методом оказалось затруднительным в силу высокого содержания воды: удалось получить устойчиво воспроизводимые данные только для Si (микроанализатор Camebax MBX с энергодисперсионным спектрометром Link AN 10000, 15 кВ, 3 нА, анализ в режиме растра с площадки $10 \times 10 \text{ мкм}$, андрадит в качестве эталона; аналитик А. Н. Некрасов). Также было установлено, что из элементов с атомными номерами выше, чем у кислорода, в новом минерале в количествах, определяемых электронно-зондовым методом, присутствует только K. Определение содержаний Na, K и Li выполнено атомно-эмиссионным методом (аналитик С. П. Пурусова), воды — с помощью метода Алимарина: растертая проба нагревалась до 1000°C , а выделившаяся вода улавливалась поглотительной трубкой, наполненной $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ (аналитик А. С. Астахова). В ходе этого же опыта было проконтролировано отсутствие CO_2 с помощью трубы с аскаритом — asbestosовым материалом, насыщенным NaOH . Отсутствие в минерале боратных и органических групп подтверждено ИК-спектром.

Химический состав чесноковита, по данным описанного комплекса методов, следующий (мас. %; в скобках — пределы содержаний): Na_2O 21.49 (20.65—22.33), K_2O 0.38 (0.31—0.45), Li_2O 0.003 (0.002—0.004), SiO_2 21.42 (20.0—22.9), H_2O 54.86, сумма 98.153. Он отвечает следующей эмпирической формуле, рассчитанной согласно структурным данным на $\text{O}_2(\text{OH})_2$: $(\text{Na}_{1.96}\text{K}_{0.02})_{\Sigma 1.98}\text{Si}_{1.005}\text{O}_2(\text{OH})_2 \cdot 7.58\text{H}_2\text{O}$. Идеализированная формула ($Z = 8$): $\text{Na}_2[\text{SiO}_2(\text{OH})_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Ей соответствует следующий теоретический состав: Na_2O 21.81, SiO_2 21.14, H_2O 57.05, сумма 100.00 мас. %.

При нагревании образца чесноковита на воздухе (дериватограф, аналитик Л. В. Мельчакова) происходит сначала быстрая потеря массы (48.5 %) в интервале 50—120 °C, затем — медленная (еще 5.5 %) при нагревании до 800 °C. Таким образом, количество молекулярной воды (7.58 молекулы на формулу), рассчитанное по результату определения методом Пенфильда, очень хорошо коррелирует с данными

термогравиметрии: 48.5 % потери массы в интервале 50—210 °C соответствует 7.59 молекулам H₂O.

Более низкое по сравнению с теоретическим измеренное содержание воды, возможно, связано с частичной дегидратацией образца при приготовлении препарата в комнатных условиях. На это же указывают пониженная сумма анализа, лучшее соответствие величины экспериментальной плотности вычисленному значению плотности для идеализированной формулы по сравнению с эмпирической и самая низкая величина индекса сходимости состава и свойств по Гладстону—Дейлу для идеализированной формулы.

Новый минерал медленно растворяется без выделения газа в разбавленной HCl, давая сгустки гелеобразного кремнезема. При длительном нахождении в холодной воде происходит «размокание» его агрегатов — видимо, частичное разложение под воздействием растворенного атмосферного CO₂, а возможно, и гидролиз.

Чесноковит — очень неустойчивый в комнатных условиях минерал. При обычных атмосферных влажности и содержании CO₂ необратимые изменения происходят по всему объему его кусочков размером 0.5—1 см в течение 2—3 дней, а в порошке — уже за первые часы. Эти изменения выражаются в дегидратации и карбонатизации: чесноковит переходит в рыхлый агрегат термонатрита и опала, вероятно, по следующей схеме: Na₂[SiO₂(OH)₂] · 8H₂O + CO₂ → Na₂CO₃ · H₂O + SiO₂ · nH₂O + (8 - n)H₂O↑. Процесс изменения ускоряется при увеличении температуры, сухости воздуха и концентрации в нем углекислого газа. Во влажном холодном воздухе шахты ядра крупных обособлений чесноковита могут оставаться свежими под термонатрит-опаловой коркой, как показывают наши наблюдения, в течение нескольких месяцев. Таким образом, для того чтобы сохранить этот минерал, в том числе в коллекциях, требуется надежная герметизация его образцов, и лучше всего непосредственно при их сборе.

Рентгеновские данные. Рентгеновское исследование монокристаллов нового минерала не было осуществлено из-за их несовершенства и неустойчивости минерала на воздухе. Анализ порошковой рентгенограммы (табл. 1) показал, что чесноковит — это природный аналог хорошо известного синтетического соединения Na₂SiO₃ · 9H₂O или, точнее, с учетом структурных особенностей, Na₂[SiO₂(OH)₂] · 8H₂O (Jamieson, Dent Glasser, 1966).

Рентгенодифракционный спектр чесноковита получен на порошковом дифрактометре STOE STADI MP с изогнутым Ge(111) монохроматором и линейным позиционно-чувствительным детектором. Кристаллическая структура нового минерала изучена с использованием метода Ритвельда по порошковым данным. Кристаллографические характеристики, а также основные параметры эксперимента и уточнения структуры чесноковита приведены в табл. 2, координаты и температурные параметры атомов — в табл. 3. Дифракционные данные обрабатывались с помощью программного комплекса Wyntet, версия 3.3 (Schneider, 1989). При уточнении в качестве исходной модели была принята структура синтетического Na₂[SiO₂(OD)₂] · 8D₂O, пр. гр. Ibca (Schmid e. a. 1984) — дейтерированного аналога чесноковита. Для описания формы пиков использовалась функция Псевдо-Войт. На начальном этапе структурная модель была зафиксирована, а уточнялись только коэффициент приведения к абсолютной шкале, ноль счетчика, параметры элементарной ячейки, асимметрия пиков (20 < 50°) и параметры ширины пиков на полувысоте при постоянном графическом моделировании фона до стабилизации значений R-факторов. На следующей стадии уточнялись структурные характеристики — координаты атомов и их изотропные тепловые параметры. На последнем этапе уточнения в структурную модель были добавлены атомы водорода, координаты которых были взяты из структуры Na₂[SiO₂(OD)₂] · 8D₂O (Schmid e. a., 1984) и соответствовали положениям атомов D. Тепловые параметры атомов H были зафиксированы, а уточнялись только их координаты. Уточнение привело к следующим заключительным значениям факторов расходимости: R_p = Σ|I_s - I_b| / Σ|I_s| = 5.77, R_{wp} = [Σw|I_s - I_b|² / Σw]^{1/2} = 7.77, GOF = {Σ[w(I_s - I_b)²] / (N_s - N_b)}^{1/2} = 1.78, R_B = Σ|I_s' - I_b'| / ΣI_s' = 2.07, R_F = Σ|F_s - F_b| / ΣF_s = 1.74, статистика по Дурбину—Ватсону DWD = 0.85 (Hill, Flack, 1987). В этих выражениях I_s' и I_b' — экспери-

Результаты расчета порошковой рентгенограммы чесноковита

X-ray powder data of chesnokovite

$I_{\text{эксп}}$	$I_{\text{выч}}$	$d_{\text{эксп}}$	$d_{\text{выч}}$	hkl	$I_{\text{эксп}}$	$I_{\text{выч}}$	$d_{\text{эксп}}$	$d_{\text{выч}}$	hkl
11	23	8.507	8.4865	020	11	6	2.003	2.0192	541
16	23	5.925	5.9078	121	3	7		2.0010	145
3	6	5.794	5.7826	002	1	2	1.998	1.9994	424
30	41	5.001	4.9932	211	3	4	1.991	1.9918	082
42	51	4.788	4.7787	022	1	1	1.971	1.9693	363
2	6	4.251	4.2432	040	2	3	1.941	1.9403	600
1	1	4.126	4.1146	202	4	4	1.917	1.9174	372
89	100	3.847	3.8383	231	4	6	1.913	1.9125	354
6	10	3.776	3.7714	141	1	1	1.882	1.8797	026
2	2	3.398	3.3908	321	1	2	1.853	1.8512	444
2	2	3.368	3.3622	123	13	18	1.837	1.8349	174
19	29	3.168	3.1635	213	4	4	1.825	1.8222	631
42	58	2.932	2.9280	400	9	1	1.813	1.8105	543
5	5	2.899	2.8913	004	11	14	1.810	1.8097	514
35	45	2.832	2.8288	060	5	7	1.803	1.8017	345
97	20	2.800	2.8087	332	1	2	1.785	1.7826	561
	55		2.7985	233					
	33		2.7882	341	1	3	1.776	1.7739	291
100	17	2.774	2.7722	143					
	58		2.7694	124					
5	4	2.741	2.7368	024	2	4	1.772	1.7701	165
11	13	2.680	2.6752	161	5	6	1.734	1.7324	613
4	1	2.615	2.6122	402	3	1	1.715	1.7180	480
	4		2.6101	323					
1	3	2.596	2.5925	204	4	6	1.711	1.7105	084
2	3	2.542	2.5370	431	2	1	1.651	1.6776	374
2	4	2.520	2.5145	134	3	5	1.648	1.6469	482
1	1	2.483	2.4794	224	3	2	1.617	1.6174	572
1	0.5	2.376	2.3893	044	7	3	1.615	1.6157	525
10	10	2.342	2.3421	352	9	8	1.612	1.6100	406
	7		2.3362	253					
6	8	2.306	2.3036	343	2	6	1.595	1.5929	066
6	4	2.302	2.3020	314	2	1	1.551	1.5498	185
7	11	2.249	2.2470	361	3	5	1.549	1.5495	653
4	6	2.220	2.2161	521	3	3	1.508	1.5075	671
17	3	2.196	2.1964	172	1	1	1.487	1.4860	615
	19		2.1922	125					
6	7	2.156	2.1535	512	1	1	1.479	1.4769	484
1	1	2.147	2.1493	334	4	4	1.457	1.4556	574
1	3	2.138	2.1342	215	1	1	1.423	1.4226	565
5	17	2.122	2.1216	080	1	3	1.418	1.4181	295
20	26	2.035	2.0344	460	1	2	1.400	1.3992	466
6	3	2.023	2.0269	532					

Таблица 2

**Кристаллографические характеристики чесноковита
и данные эксперимента по уточнению его
кристаллической структуры**

**Crystallographic parameters and structure-refinement
information for chesnokovite**

Формула	Na ₂ [SiO ₂ (OH) ₂]·8H ₂ O
Пространственная группа; Z	Ibca; 8
Параметры элементарной ячейки (Å)	a = 11.7119(6), b = 16.973(1), c = 11.5652(6)
Объем элементарной ячейки (Å ³)	2299.0(2)
a : b : c	0.6900 : 1 : 0.6814
ρ _{выч} , г/см ³	1.64
μ, мм ⁻¹	0.328
Излучение; длина волны (Å)	CuK _{α1} ; 1.54056
2θ интервал, град	8.00—105.48
Число рефлексов	661
Число уточняемых параметров	67
R _P	5.77
R _{wp}	7.77
R _B	2.07
R _F	1.74

ментальное и вычисленное значения интегральных интенсивностей Брэгговских отражений, I_0 и I_1 — экспериментальные и вычисленные интенсивности. Рис. 3 дает представление о хорошем соответствии экспериментального и рассчитанного рентгенодифракционных спектров чесноковита.

Кристаллическая структура. Структура чесноковита (рис. 4), как и его синтетического аналога (Jamieson, Dent Glasser, 1966; Schmid e. a., 1984), образована изолированными тетраэдрическими анионами [SiO₂(OH)₂]²⁻ (две вершины каждого кремниевого тетраэдра представлены атомами O, а еще две — группами OH и вытянутыми вдоль [100] цепочками из соединенных по ребрам комплексных катионов [Na(H₂O)₆]⁺). Межатомные расстояния в тетраэдре колеблются от 1.553 (10) Å [с атомом O(2) = O] до 1.658 (10) Å [с O (1) = OH], расстояния в октаэдре Na(H₂O)₆ находятся в пределах от 2.335 (9) до 2.498 (10) Å. Si- и Na-полиэдры соединяются только водородными связями. Между собой изолированные тетраэдры [SiO₂(OH)₂] объединяются водородными связями в псевдослои, перпендикулярные оси b (рис. 4), что

Таблица 3

Координаты атомов и изотропные температурные параметры для чесноковита

Atom coordinates and isotropic thermal parameters for chesnokovite

Атом	x	y	z	U _{изо}	Атом	x	y	z	U _{изо}
Si	0.3770(16)	0.0	0.25	0.028(3)	H(2)	0.09(3)	0.035(14)	0.49(2)	0.1
Na	0.1244(10)	0.1817(6)	0.4143(6)	0.038(3)	H(3)	0.04(2)	0.013(15)	0.39(2)	0.1
O(1)	0.2898(14)	0.0540(12)	0.1696(12)	0.039(6)	H(4)	0.05(2)	0.138(17)	0.209(19)	0.1
O(2)	0.4469(12)	0.0541(12)	0.3319(12)	0.030(5)	H(5)	0.17(2)	0.134(15)	0.205(19)	0.1
O(3)	0.119(2)	0.0379(10)	0.4339(14)	0.033(5)	H(6)	0.37(2)	0.133(12)	0.093(17)	0.1
O(4)	0.1122(18)	0.1649(10)	0.2061(12)	0.025(5)	H(7)	0.40(2)	0.167(11)	-0.027(16)	0.1
O(5)	0.4140(14)	0.1755(12)	0.0536(12)	0.044(6)	H(8)	0.38(2)	0.159(13)	0.365(18)	0.1
O(6)	0.3215(12)	0.1905(12)	0.3848(16)	0.047(8)	H(9)	0.35(2)	0.238(14)	0.339(18)	0.1
H(1)	0.27(2)	0.016(9)	0.11(2)	0.1					

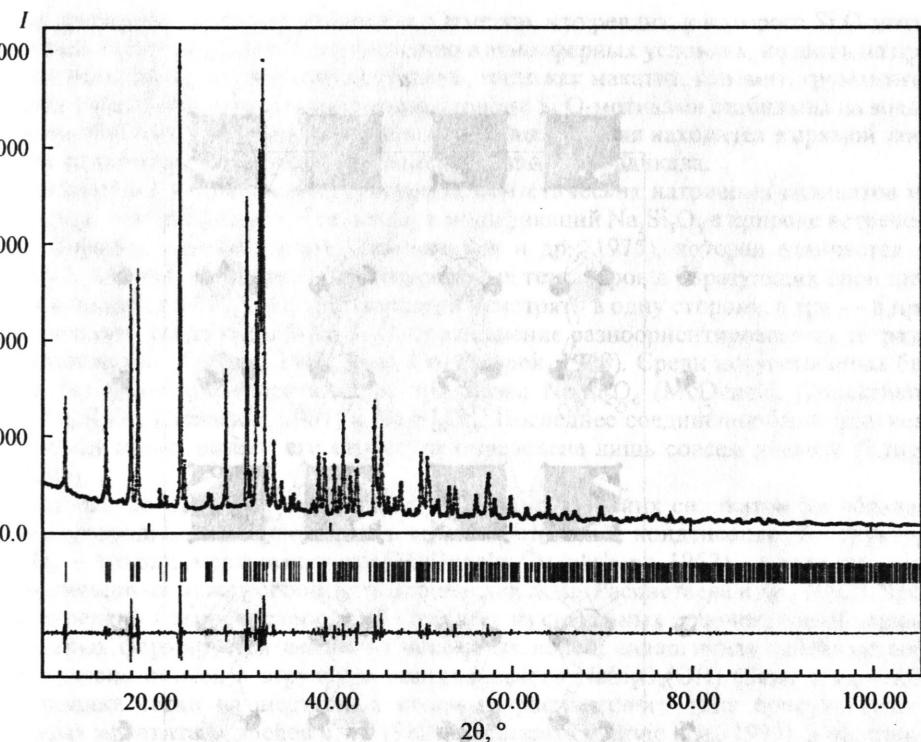


Рис. 3. Экспериментальная и теоретическая (штрихи) рентгенограммы чесноковита.

Вертикальные штрихи показывают местоположение рефлексов теоретической порошковой диаграммы, а кривая в нижней части рисунка — разностная кривая интенсивностей экспериментальной и теоретической рентгенограмм.

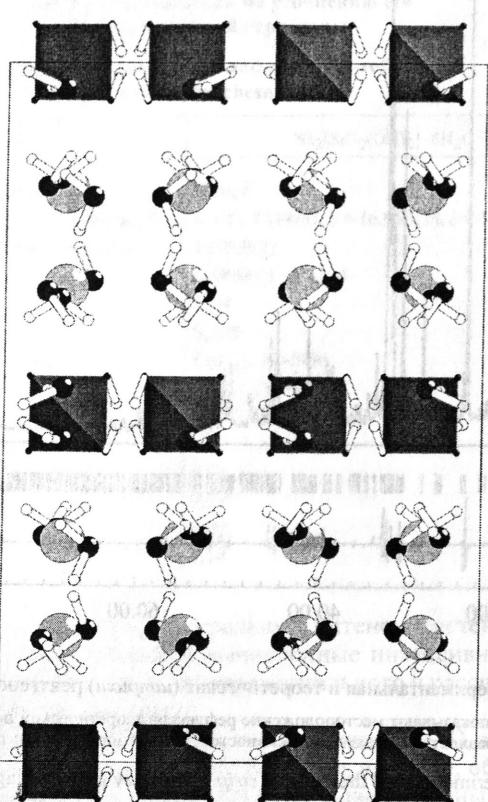
Fig. 3. Experimental and theoretical (strip line) X-ray powder diagrams of chesnokovite.

придает всей структуре чесноковита слоистый характер и обуславливает совершенную спайность по {010}.

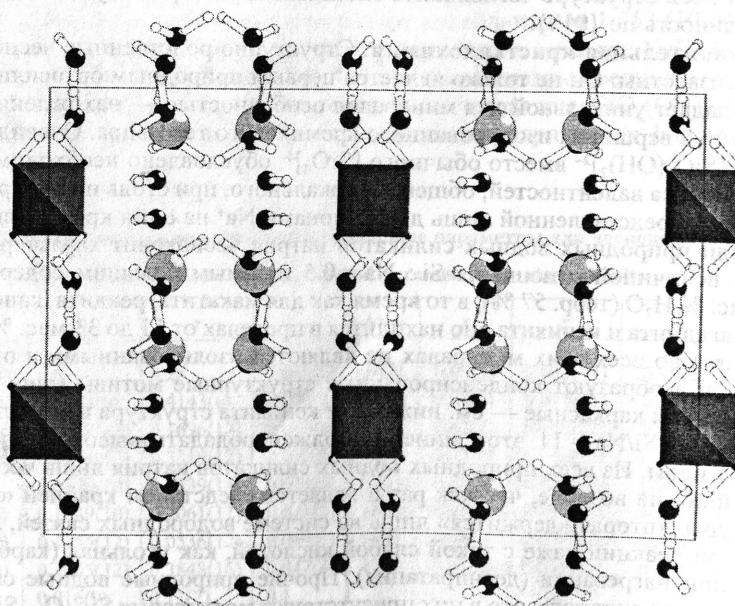
Сравнительная кристаллохимия. Структурно родственные чесноковиту минералы неизвестны. Он не только является первым природным ортосиликатом натрия, но и обладает уникальной для минералов особенностью — нахождением сразу двух OH-групп в вершинах изолированного кремниевого тетраэдра. Очевидно, появление аниона $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ вместо обычного $[\text{SiO}_4]^{4-}$ обусловлено необходимостью соблюдения баланса валентностей, общего и локального, при столь низкозарядной катионной части, представленной лишь двумя ионами Na^+ на один кремниевый тетраэдр.

Среди природных водных силикатов натрия чесноковит характеризуется самой низкой величиной отношения $\text{Si} : \text{Na} = 0.5$ и самым большим содержанием воды: 54.9 мас. % H_2O (теор. 57 %), в то время как для макатита, ревдита, канемита, грумантита, магадинита и кенияита оно находится в пределах от 11 до 33 мас. %. Кремниевые тетраэдры во всех этих минералах не являются изолированными в отличие от чесноковита, а образуют конденсированные структурные мотивы (рис. 5): ленточные, слоистые или каркасные — см. ниже. Для кенияита структура неизвестна, но судя по отношению $\text{Si}/\text{Na} = 11$ этот минерал должен обладать высококонденсированным Si_2O -мотивом. Из всех природных водных силикатов натрия лишь чесноковит очень неустойчив на воздухе, что как раз и является следствием крайней «рыхлости» его структуры, которая «держится» лишь на системе водородных связей, легко разрываемых при реакции даже с такой слабой кислотой, как угольная (карбонатизация), а также при нагревании (дегидратация). Прочие природные водные силикаты более устойчивы за счет того, что в них присутствуют мостиковые $\text{Si}—\text{O}—\text{Si}$ связи в беско-

a



b



нечных кремнекислородных радикалах. Отметим, что ревдит, у которого Si₂O-мотив ленточный, также подвергается изменению в атмосферных условиях, но лишь на протяжении нескольких лет и в слабой степени, тогда как макатит, канемит, грумантиит и магадиит с еще более высококонденсированными Si₂O-мотивами стабильны на воздухе. Таким образом, устойчивость водных силикатов натрия находится в прямой зависимости от степени конденсации кремнекислородного радикала.

Разнообразие, в том числе структурное, синтетических натриевых силикатов намного шире, чем природных. Так, из двух модификаций Na₂Si₂O₅ в природе встречена только β-форма — натросилит (Тимошенков и др., 1975), которая отличается от α-Na₂Si₂O₅ числом одинаково ориентированных тетраэдров в образующих слои шестерных кольцах: в α-Na₂Si₂O₅ три тетраэдра «смотрят» в одну сторону, а три — в противоположную, тогда как в β-Na₂Si₂O₅ соотношение разноориентированных тетраэдров составляет 4 : 2 (Plant, 1968; Pant, Cruickshank, 1968). Среди искусственных безводных Na-силикатов известны еще три фазы: Na₄Si₂O₆ (McDonald, Cruickshank, 1967), Na₄Si₆O₁₄ (Jamieson, 1967) и Na₆Si₈O₁₉. Последнее соединение было получено более 40 лет назад, однако его структура определена лишь совсем недавно (Kruger e. a., 2005).

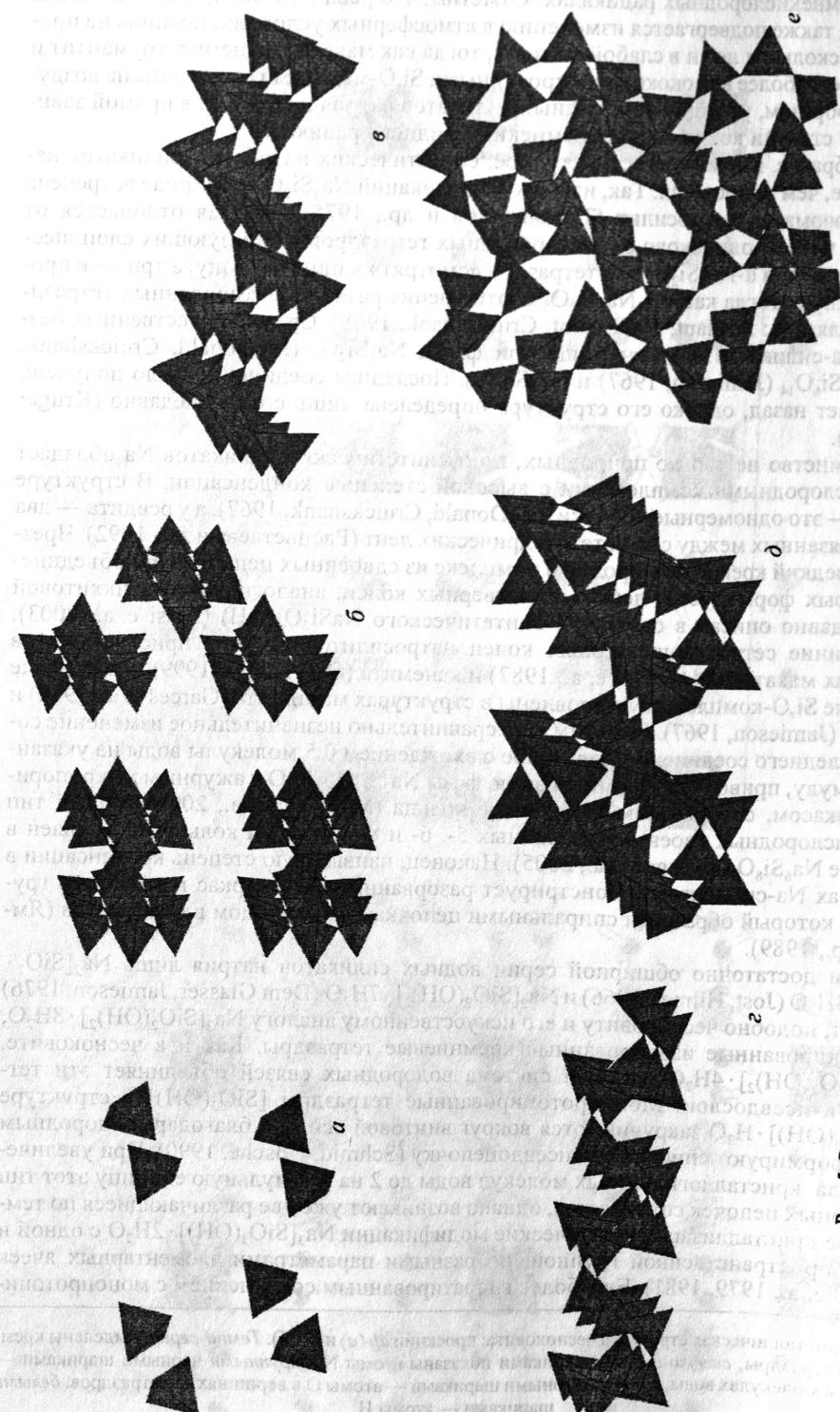
Большинство не только природных, но и синтетических силикатов Na обладает кремнекислородными комплексами с высокой степенью конденсации. В структуре Na₄Si₂O₆ — это одномерные цепочки (McDonald, Cruickshank, 1967), а у ревдита — два типа не связанных между собой тетраэдрических лент (Расцветаева и др., 1992). Чрезвычайно редкий кремнекислородный комплекс из сдвоенных цепочек, при объединении которых формируется лента из четверных колец, аналогичная кайсикхитовой ленте, недавно описан в структуре синтетического NaSi₂O₄(OH) (Sassi e. a., 2003). Двусторонние сетки из шестерных колец натросилитового типа присутствуют в структурах макатита (Annealed e. a., 1982) и канемита (Garvie e. a., 1999), а объемные двумерные Si₂O-комpleksы установлены в структурах магадиита (Garcés e. a., 1988) и Na₄Si₆O₁₄ (Jamieson, 1967). Отметим, что сравнительно незначительное изменение состава последнего соединения, связанное с вхождением 0.5 молекулы воды на указанную формулу, приводит к формированию фазы Na₂Si₃O₇ · H₂O с ажурным микропористым каркасом, содержащим 10-членные кольца (Matijasic e. a., 2000). Новый тип кремнекислородных слоев, образованных 5-, 6- и 8-членными кольцами, выявлен в структуре Na₆Si₈O₁₉ (Kruger e. a., 2005). Наконец, наивысшую степень конденсации в структурах Na-силикатов демонстрирует разорванный Si₂O-каркас в структуре грумантиита, который образован спиральными цепочками с периодом в 4 тетраэдра (Ямнова и др., 1989).

Среди достаточно обширной серии водных силикатов натрия лишь Na₂[SiO₂ · (OH)₂] · 4H₂O (Jost, Hilmer, 1966) и Na₂[SiO₂(OH)₂] · 7H₂O (Dent Glasser, Jamieson, 1976) содержат, подобно чесноковиту и его искусственному аналогу Na₂[SiO₂(OH)₂] · 8H₂O, бипротонированные изолированные кремниевые тетраэдры. Как и в чесноковите, в Na₂[SiO₂(OH)₂] · 4H₂O сложная система водородных связей объединяет эти тетраэдры в псевдослои. Монопротонированные тетраэдры [SiO₃(OH)] в структуре Na₃[SiO₃(OH)] · H₂O закручиваются вокруг винтовой оси 2₁ и благодаря водородным связям формируют спиральную псевдоцепочку (Schmid, Felsche, 1990). При увеличении числа кристаллогидратных молекул воды до 2 на формульную единицу этот тип одномерных цепочек сохраняется, однако возникают уже две различающиеся по температуре кристаллизации ромбические модификации Na₃[SiO₃(OH)] · 2H₂O с одной и той же пространственной группой, но разными параметрами элементарных ячеек (Schmid e. a., 1979, 1981). Еще более гидратированным соединением с монопротони-

Рис. 4. Кристаллическая структура чесноковита: проекции ab (а) и bc (б). Темно-серым выделены кремниевые тетраэдры, светло-серыми шариками показаны атомы Na, крупными черными шариками — атомы O в молекулах воды, мелкими черными шариками — атомы O в вершинах Si₂-тетраэдров, белыми шариками — атомы H.

Fig. 4. Crystal structure of chesnokovite — ab (a) and bc (b) projections.

Fig. 5. Different Si₄O-complexes in natural hydrous sodium silicates.



a — изолированные тетраэдры в чесноковите; *b* — два типа не связанных между собой тетраэдрических лент в риекбеките (Расцветаева и др., 1992); *c* — слои в макатите (Аппене и др., 1989); *d* — состоящие из трубчатых лент слои в магадините (Garcés е. а., 1998); *e* — разорванный каркас в грумантите (Ямнова и др., 1989).

рованными тетраэдрами $[\text{SiO}_3(\text{OH})]$ является $\text{Na}_3[\text{SiO}_3(\text{OH})] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, где кремниевые тетраэдры объединяются попарно водородными связями в группы состава $\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_2$ (Смолин и др., 1973). В структуре синтетической фазы $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Na-октаэдры образуют слои, к которым «подвешены» одной (ОН)-вершиной ортотетраэдры $[\text{SiO}_3(\text{OH})]$ (Williams, Dent Glasser, 1971). Оригинальный кремнекислородный комплекс, представляющий собой слои, образованные лентами из пятерных колец, описан в структуре микропористого соединения $\text{Na}[\text{Si}_4\text{O}_8(\text{OH})] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Vortmann e. a., 1997).

Как видно из приведенного краткого обзора, силикаты натрия, особенно синтетические, обладают очень большим разнообразием структур, и находка, причем в ощущимых количествах, чесноковита, содержащего изолированные бипротонированные тетраэдры $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]$, указывает на возможность существования в природе представителей и других подобных структурных типов.

Особенности генезиса. Чесноковит может рассматриваться как чуткий индикатор условий формирования. Структура, химические свойства и поведение при нагревании показывают, что он очень чувствителен к таким параметрам минералообразующей среды, как температура и активность CO_2 , которые, очевидно, должны быть очень низкими. В жиле Кедыкверпах-22 отсутствуют карбонаты (встречены лишь единичные зерна карбонато-фосфата сидоренкита), а там, где они развиты, нет чесноковита. Легкость изменения этого минерала в термонаитрит и опал свидетельствует о том, что его парагенезис с карбонатами, видимо, относится к числу запрещенных. Образование чесноковита, скорее всего, происходит при температурах не выше 50 °C (с учетом возможного влияния давления эта цифра может быть увеличена, но в любом случае она вряд ли превышает 70—80 °C). Синтетический аналог минерала получен путем кристаллизации из водного раствора при 20 °C (Schmid e. a., 1984).

Известно, что в водных натриево-карбонатных системах при низких температурах (< 32 °C) образуется натрон $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, содержащий 63 мас. % H_2O . Он распространен и в дифференциатах агпайтовых пород, где рассматривается не только как гипергенный (Дорфман и др., 1969), но и как и гипогенный минерал (Хомяков, 1990). Вероятно, чесноковит кристаллизуется в сходных условиях из обогащенных Na, но при этом резко обедненных CO_2 достаточно холодных растворов.

Нахождение чесноковита в жилах, залегающих среди массивных интрузивных пород на большой глубине от дневной поверхности, говорит в пользу того, что он, скорее всего, имеет не гипергенное, а эндогенное происхождение. Представляется, что этот минерал кристаллизовался на последней стадии эволюции ультранатриевой гидротермальной системы, в самом конце или уже после окончания процесса остывания верхней части Ловозерского plutона.

Благодарности. Авторы благодарны Л. И. Ксенофонтовой и В. В. Левицкому за содействие в полевых работах, С. П. Пурусовой, А. С. Астаховой, А. Н. Некрасову, Л. В. Мельчаковой, Ю. К. Кабалову и Е. Р. Гобечия за помощь в исследовании минерала, а Л. А. Паутова за обсуждение материала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-05-64024-а), совместного гранта РФФИ-БНТС Австрии № 06-05-90626-БНТС_a, а также грантов МД-7230.2006, МК-4479.2006.5, НШ-4818.2006.5 и НШ-4964.2006.5 президента РФ.

Список литературы

- Дорфман М. Д., Пилоян Г. О., Онохин Ф. М. О десятиводном карбонате натрия — соде в Хибинском щелочном массиве // Тр. Минер. музея АН СССР. 1969. В. 19. С. 159—164.
Пеков И. В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М.: Земля, 2001. 432 с.
Пеков И. В. Ультращелочные жильные гидротермалиты в породах рудоносного расслоенного комплекса Ловозерского массива, Кольский полуостров: минералогия и механизм образования // Тр. III Ферсмановской научной сессии Кольского отд-ния РМО. Апатиты. 2006. С. 132—135.

Расцветаева Р. К., Михеева М. Г., Ямнова Н. А., Пущаровский Д. Ю., Хомяков А. П. Кристаллическая структура ревдита $\text{Na}_{16}[\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_5]_2(\text{Si}_8\text{O}_{15}(\text{OH})_6)(\text{OH})_{10} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ // Кристаллография. 1992. Т. 37. С. 1177—1184.

Смолин Ю. И., Шепелев Ю. Ф., Бутикова И. К. Определение кристаллической структуры гидросиликата натрия $\text{Na}_3\text{HSiO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ // Кристаллография. 1973. Т. 18. С. 281—286.

Тимошенков И. М., Меньшиков Ю. П., Ганибаль Л. Ф., Буссен И. В. Природный силикат натрия — натросилит из Ловозерского массива // ЗВМО. 1975. Вып. 3. С. 317—321.

Хомяков А. П. Минералогия ультрааграпитовых щелочных пород. М.: Наука, 1990. 196 с.

Хомяков А. П., Степанов В. И., Быкова А. В., Наумова И. С. Макатит — $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ — первая находка в СССР // Докл. АН СССР. 1980а. Т. 255. С. 971—976.

Хомяков А. П., Черепицкая Г. Е., Куррова Т. А., Власюк В. П. Ревдит $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ — новый минерал // ЗВМО. 1980б. Вып. 5. С. 566—569.

Хомяков А. П., Коробицын М. Ф., Куррова Т. А., Черепицкая Г. Е. Груманит $\text{NaHSi}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ — новый минерал // ЗВМО. 1987. Вып. 2. С. 244—248.

Чесноков Б. В., Попов В. А., Никандров С. Н. Тенардит-мирабилитовая минерализация Ильменских и Вишневых гор на Урале — новый тип сульфатной минерализации щелочных массивов // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263. С. 693—696.

Ямнова Н. А., Пущаровский Д. Ю., Андрианов В. И., Расцветаева Р. К., Хомяков А. П., Михеева М. Г. Новый тип кремнекислородного радикала в структуре груманита $\text{Na}[\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})]\text{H}_2\text{O}$ // Докл. АН СССР. 1989. Т. 305. С. 868—871.

Annealed H., Faeth L., Lincoln F. J. Crystal structure of synthetic makatite $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_8(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4$ // Zeit. Krist. 1982. Vol. 159. P. 203—210.

Dent Glasser L. S., Jamieson P. B. Sodium silicate hydrates. V. The crystal structure of $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ // Acta Crystallogr. 1976. B32. P. 705—710.

Eugster H. P. Hydrous sodium silicates from Lake Magadi, Kenya: precursors of bedded chert // Science. 1967. Vol. 157. P. 1177—1180.

Garces J. M., Rocke S. C., Crowder C. E., Hasha D. L. Hypothetical structures of magadiite and sodium octosilicate and structural relationships between the layered alkali metal silicates and the mordenite- and pentasil-group zeolites // Clays and Clay Minerals. 1988. Vol. 36. P. 409—418.

Garvie L. A. J., Devouard B., Groy T. L., Camara F., Buseck P. R. Crystal structure of kanemite, $\text{NaHSi}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, from the Aris phonolite, Namibia // Amer. Miner. 1999. Vol. 84. P. 1170—1175.

Hill R. J., Flack H. D. The use of the Durbin-Watson d statistics in Rietveld analysis // J. Appl. Cryst. 1987. Vol. 20. P. 356—361.

Jamieson P. B., Dent Glasser L. S. Sodium silicate hydrates. II. The crystal structure of $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ // Acta Cryst. 1996. Vol. 20. P. 688—693.

Jamieson P. B. Crystal structure of $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$: a new type of silicate sheet // Nature. 1967. Vol. 214. P. 794—796.

Johan Z., Maglione G. F. La kanemite, nouveau silicate de sodium hydrate de neoformation // Bull. Soc. fr. Mineral. 1972. Vol. 95. P. 371—382.

Jost K. H., Hilmer W. Die Struktur von $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ // Acta Crystallogr. 1966. Vol. 21. P. 583—589.

Kruger H., Kahlenberg V., Kaindl R. Structural studies on $\text{Na}_6\text{i}_8\text{O}_{19}$ — a monosilicate with a new type of layered silicate anion // Solid State Science. 2005. Vol. 7. P. 1390—1396.

Mandarino J. A. The Gladstone-Dale relationship: Part IV. The compatibility concept and its application // Canad. Miner. 1981. Vol. 19. P. 441—450.

Matijasic A., Marler B., Patarin J. Synthesis and characterization of Mu-11: a porous sodium trisilicate $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ with 10-membered ring openings // Int. J. Inorg. Materials. 2000. Vol. 2. P. 209—216.

McDonald W. S., Cruickshank D. W. J. A reinvestigation of the structure of sodium metasilicate, $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_3$ // Acta Crystallogr. 1967. Vol. 22. P. 37—43.

Pant A. K. A reconsideration of the crystal structure of $\beta\text{-Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ // Acta Crystallogr. 1968. B24. P. 1077—1083.

Pant A. K., Cruickshank D. W. J. The crystal structure of $\alpha\text{-Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ // Acta Crystallogr. 1968. B24. P. 13—19.

Sassi M., Gramlich V., Miehe-Brendle J., Josien L., Paillaud J.-L., Benggedach A., Patarin J. Synthesis and characterization of a new one-dimensional sodium silicate named Mu-29 // Microporous and mesoporous Materials. 2003. Vol. 64. P. 51—61.

Schmid R. L., Felsche J. Structure of trisodium hydrogenorthosilicate monohydrate // Acta Crystallogr. 1990. C46. P. 1365—1368.

Schmid R., Huttner G., Felsche J. The structure of trisodium hydrogensilicate dihydrate // Acta Crystallogr. 1979. B35. P. 3024—3027.

Schmid R. L., Szolnai L., Felsche J., Huttner G. The structure of trisodium hydrogensilicate dihydrate: high temperature form // Acta Crystallogr. 1981. B37. P. 789—792.

Schmid R. L., Felsche J., McIntyre G. J. Location and anisotropic refinement of deuterium atoms in deuterium sodium silicate — deuterium oxide (1/8) $\text{Na}_2\text{D}_2\text{SiO}_4 \cdot 8\text{D}_2\text{O}$ by neutron diffraction; hydrogen bonding at 173 K // Acta Crystallogr. 1984. C40. P. 733—736.

Schneider J. Profile refinement on IBM-PC's, Int. Workshop on the Rietveld method. Petten. 1989. 71 p.

Sheppard R. A., Gude A. J., III, Hay R. L. Makatite, a new hydrous sodium silicate mineral from Lake Magadi, Kenya // Amer. Miner. 1970. Vol. 55. P. 358—366.

Vortmann S., Rius J., Siegman S., Gies H. Ab initio structure solution from X-ray powder data at moderate resolution: Crystal structure of a microporous layer silicate // J. Phys. Chem. 1997. Vol. 101. P. 1292—1297.

Williams P. P., Dent Glasser L. S. Sodium Silicate Hydrates. IV. Location of hydrogen atoms in $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ by neutron diffraction // Acta Crystallogr. 1971. B27. P. 2269—2275.

Поступила в редакцию
11 октября 2006 г.

УДК 549.6

ЗРМО, № 2, 2007 г.
Zapiski RMO, N 2, 2007

© Почетный член А. П. ХОМЯКОВ, * д. чл. Г. Н. НЕЧЕЛЮСТОВ, **

д. чл. Р. К. РАСЦВЕТАЕВА***

АКАВАЛИТ (H_3O)₈($\text{Na},\text{K},\text{Sr}$)₅ $\text{Ca}_6\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{66}$ (OH)₉Cl — НОВЫЙ МИНЕРАЛ ГРУППЫ ЭВДИАЛита ИЗ ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА ИНАГЛИ, САХА-ЯКУТИЯ, РОССИЯ, И ПРОБЛЕМА ОКСОНИЯ В ГИДРАТИРОВАННЫХ ЭВДИАЛИТАХ¹

A. P. KHOMYAKOV, G. N. NECHELYUSTOV, R. K. RASTSVETAeva. AQUALITE, (H_3O)₈($\text{Na},\text{K},\text{Sr}$)₅ $\text{Ca}_6\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{66}$ (OH)₉Cl, A NEW EUDIALYTE-GROUP MINERAL FROM INAGLI ALKALINE MASSIF (SAKHA-YAKUTIA, RUSSIA), AND THE PROBLEM OF OXONIUM IN HYDRATED EUDIALYTES

* Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов,

121357, Москва, ул. Вересаева, 15

** Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья,
109017, Москва, Старомонетный пер., 31

*** Институт кристаллографии РАН, 117333, Москва, Ленинский пр., 59

This paper describes a new eudialyte-group mineral from hydrothermally altered agpaic pegmatites of the Inagli alkaline massif (Sakha-Yakutia, Russia). It associates with natrolite, microcline, eckermannite, aegirine, batisite, innelite, lorenzenite, thorite, and galena. The mineral forms isometric crystals up to 3 cm across. It is pale pink, transparent, with conchoidal fracture; brittle; no cleavage or parting observed; luster vitreous; streak white. Mohs' hardness 4—5. $D(\text{meas.}) = 2.58(2) \text{ g/cm}^3$ (volumetric method), $D(\text{calc.}) = 2.66 \text{ g/cm}^3$. Optically uniaxial, positive, $n_o = 1.569(1)$, $n_e = 1.571(1)$. Pleochroism $N_o < N_e$; N_o — colorless to pale pink, N_e — pink. Its weak fluorescence is dull yellow in ultraviolet light and the mineral is stable in 50 % HCl and HNO₃ at room temperature. Weight loss with annealing at 500 °C is 9.8 %. Trigonal, space group R3, $a = 14.078(3) \text{ \AA}$, $c = 31.24(1) \text{ \AA}$, $V = 5362(2) \text{ \AA}^3$, $Z = 3$. The strongest lines in the powder diffraction pattern are [d, Å (I)(hkl)]: 4.39(100) (2005), 2.987(100) (315), 2.850(79) (404), 10.50(44) (003), 6.63(43) (104), 7.06(42) (110), 3.624(41) (027), 11.43(39) (101). Chemical composition (wt %, electron microprobe, H₂O content by the Penfield method): Na₂O 2.91, K₂O 1.93, CaO 11.14, SrO 1.75, BaO 2.41, FeO 0.56, MnO 0.30, La₂O₃ 0.17, Ce₂O₃ 0.54, Nd₂O₃ 0.36, Al₂O₃ 0.34, SiO₂ 52.70, ZrO₂ 12.33, TiO₂ 0.78, Nb₂O₅ 0.15, Cl 1.50, H₂O 9.93, —O—Cl 0.34; total 99.46. Empirical formula based on $\Sigma(\text{Si},\text{Zr},\text{Ti},\text{Al},\text{Nb}) = 29$ is $[(\text{H}_3\text{O})_{7.94}\text{Na}_{2.74}\text{K}_{1.20}\text{Sr}_{0.49}\text{Ba}_{0.46}\text{Fe}_{0.23}\text{Mn}_{0.12}]_{\Sigma 13.18}(\text{Ca}_{5.79}\text{REE}_{0.19})_{\Sigma 5.98}(\text{Zr}_{2.92}\text{Ti}_{0.08})_{\Sigma 3.0}(\text{Si}_{25.57}\text{Ti}_{0.21}\text{Al}_{0.19}\text{Nb}_{0.03})_{\Sigma 26.0}[\text{O}_{66.46}(\text{OH})_{5.54}]_{\Sigma 72.0}[(\text{OH})_{2.77}\text{Cl}_{1.23}]_{\Sigma 4.0}$. Idealized formula: $(\text{H}_3\text{O})_8(\text{Na},\text{K},\text{Sr})_5\text{Ca}_6\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{66}$ (OH)Cl. The mineral differs from typical eudialyte by having the extremely low contents of Na and Fe, with more than 50 % Na isomorphically replaced by (H₃O)⁺ groups. The presence of oxonium ions is confirmed by IR-spectroscopic and X-ray single crystal structure analyses. The mineral is compared with five other structurally studied high-oxonium analogues from alkaline massif in several different regions. All these minerals are shown to have been formed under relatively low-temperature conditions through ion-exchange transformation of some «proto-eudialytes», with the successor minerals inheriting the main structural and compositional features of the precursor minerals. The name «aqualite» derives from Latin «aqua» in allusion to its specific chemical composition. Type material is deposited at the Fersman Mineralogical Museum, Moscow.

¹ Минерал и его название утверждены КНМНМ MMA 3 апреля 2003 г.