

УДК 549.657 + 548.6

© Д. чл. Р. К. РАСЦВЕТАЕВА,* д. чл. Н. В. ЧУКАНОВ**

ПРИНЦИПЫ КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА

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

e-mail: rast@ns.crys.ras.ru

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

В группе эвдиалита установлено 25 минеральных видов. Еще более 50 представителей, в том числе потенциально новых минеральных видов, изучено методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. Предлагаемая в данной работе кристаллохимическая классификация использует иерархический принцип, учитывающий наличие модулярного характера структуры и величину параметра c , симметрию, распределение компонентов по ключевым микрообластям и степень гидратированности.

Ключевые слова: принцип доминирования, ключевая позиция, уникальные фрагменты, иерархический принцип, кристаллохимические типы, эвдиалит.

R. K. RASTSVETAEVA, N. V. CHUKANOV. PRINCIPLES OF CRYSTAL-CHEMICAL CLASSIFICATION OF THE EUDIALYTE-GROUP MINERALS

According to rules accepted by the IMA CNMNC, definition of a new species within the eudialyte group must be based on the general crystal-chemical principle of the predominance of a new element in one or in several key sites. Up to date, 25 minerals of eudialyte-group have been approved according to this recommendation. Additionally, 50 samples (including potentially new species of the eudialyte group) have been investigated using IR spectroscopy and X-ray structure analysis. New data revealed the necessity of modifications and additions to the current systematization of the eudialyte group. Eudialyte-like structures contain unique fragments involving species-determining key sites. Crystal-chemical classification suggested in the present work is based on the hierarchical principle of taking into account the following features (listed in order of their classification rank lowering): A. Simple or modulator character of the crystal structure and the value of the c parameter (about 30 Å for 12-layer minerals and about 60 Å for 24-layer ones). B. Symmetry determined by the cation ordering in the octahedral ring (*i. e.* the possibility of the decomposition of $M(1)$ site into the $M(1a)$ and $M(1b)$). C. The distribution of different components over five «square-based» $M(2)$ sites. D. Water content (the subdivision of eudialyte-group minerals into low-water species with $\text{Na} > (\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O})$ and the high-water ones with $\text{Na} < (\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O})$). 12-layer minerals are subdivided into eudialyte-type and oneillite-type ones. Further subdivision of the two types into subtypes is made taking into account the predominance of octahedral, tetrahedral or vacancies in the sites $M(3)$ and $M(4)$ at the centers of 9-membered Si₃O-rings, as well as different combinations of these variants. Both terms «type» and «subtype» are applied here in the crystal-chemical sense. Among 24-layer minerals, the first subdivision is made on the base of the hydration degree; the second subdivision into subtypes is made taking into account combinations of predominant components (Zr + Zr, Ti + Ti or Zr + Ti) in Z octahedral of different modules («floors»). A short characterization of different eudialyte-group minerals belonging to different crystal-chemical taxons is given.

Key words: principle of the predominance, key sites, unique fragments, hierarchical principle, crystal-chemical types, eudialyte.

ВВЕДЕНИЕ

Научный интерес к цирконосиликату—эвдиалиту, широко распространенному во многих регионах мира, вызван, в частности, тем, что ему принадлежит одно из центральных мест в минералогии и геохимии циркония. Николай Васильевич Белов стоял у истоков кристаллохимии эвдиалита, и заложенные им идеи получили дальнейшее развитие. Он предвидел, что за названием «эвдиалит» скрывается не один минерал, поэтому в «Очерках» (Белов, 1976) писал: «...минералы **группы эвдиалита** (выделено авт.) могут быть породообразующими в пегматитах».

Состав минералов группы эвдиалита, с учетом кристаллохимических особенностей, по рекомендациям Подкомитета по эвдиалитам при КНМНМ ММА, может быть описан общей формулой $N(1)_3N(2)_3N(3)_3N(4)_3N(5)_3M(1)_6M(2)_{3-6}M(3)M(4)Z_3[Si_{24}O_{72}] \cdot O_{4-6}X_2$ (Johnsen et al., 2003a). Здесь $N(1-5) = Na, H_3O^+, K, Sr, REE, Y, Ba, Mn, Ca$; $M(1) = Ca, Mn, REE, Na, Sr, Fe$; $M(2) = Fe, Mn, Na, Zr, Ta, Ti, K, Ba, H_3O$; $M(3)$ и $M(4) = Si, S, Nb, Ti, W, Na$; $Z = Zr, Ti, Nb$; $O' = O, OH, H_2O$; $X(1)$ и $X(2) = Cl, F, H_2O, OH, CO_3, SO_4, AlO_4, MnO_4$. Буквенные обозначения характеризуют набор элементов, а также их положение в структуре (рис. 1). Как правило, одно буквенное обозначение соответствует не позиции, а группе близко расположенных позиций, и каждой букве соответствует микрообласть в элементарной ячейке, которая на конкурентной основе может заселяться теми или иными компонентами, которые могут отличаться друг от друга размером, координационным числом и зарядом. Но и с этой оговоркой приведенная выше формула далеко не охватывает всего разнообразия кристаллохимических особенностей минералов группы эвдиалита, в частности возможности существования дополнительных позиций воды или упорядочения катионов в октаэдрическом кольце с распадом позиции $M(1)$ на $M(2)$ и $M(1b)$.

Гетерополиэдрический каркас эвдиалита составлен из тройных и девятерных кремнекислородных колец и шестерных колец из октаэдров $M(1)O_6$, объединенных изолированными октаэдрами ZrO_6 . В полостях каркаса размещаются катионы щелочных, щелочноземельных металлов, оксония, переходных элементов, крупные дополнительные анионы и молекулы воды. Разнообразие минералов группы эвдиалита с близкими структурными мотивами связано с наличием в них ключевых позиций или микрообластей, где возможны локальные, но часто кардинальные структурные перестройки с изменением валентности и координационного числа, замещением атома группой атомов и т. д.

В группе эвдиалита наибольшим распространением пользуются виды с относительно низкоупорядоченной 12-слойной структурой описываемой гексагональной ячейкой с параметрами $a \sim 14 \text{ \AA}$, $c \sim 30 \text{ \AA}$. Процессы упорядочения в расселении катионов, которые могут затрагивать практически все позиции, внутрикаркасные и каркасные (кроме Si-позиций кремнекислородных колец), образуют сверхструктуры в ряде минералов группы эвдиалита с кратно увеличенным периодом c около 60 \AA , открытых А. П. Хомяковым в Ловозерском и Хибинском массивах Кольского п-ова. В обозначениях, рекомендованных тем

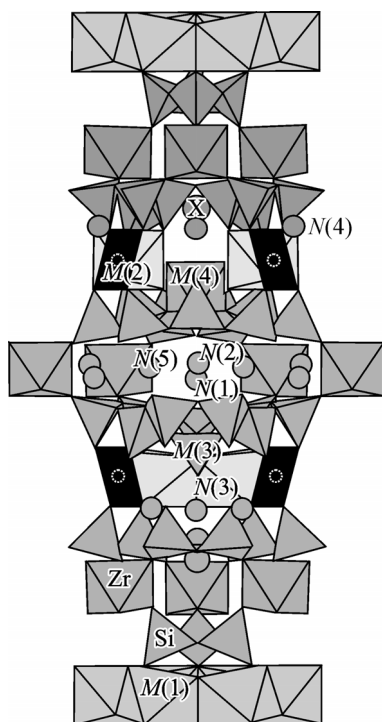


Рис. 1. Полиэдрическое изображение структуры минералов группы эвдиалита. Буквами обозначены позиции катионов.

Fig. 1. Polyhedral image of the eudialyte-group minerals structure. Letters show positions of cations.

же Подкомитетом, состав таких 24-слойных минералов может быть схематически описан общей формулой $[N(1)N(1)^*N(2)N(2)^*N(3)N(3)^*N(4)N(4)^*N(5)N(5)^*N(6) \cdot N(7)]_3 [M(1)M(1)^*]_6 [M(2)M(2)^*]_3 M(3)M(3)^*M(4)M(4)^*Z_3Z_3^*[Si_{24}O_{72}][Si_{24}O_{72}]^*\Phi_4\Phi_4 \cdot *X_2X_2^*$. Одинаковым символом без звездочки и со звездочкой в ней обозначены гомологичные позиции соответственно первого и второго модулей структуры.

КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ КЛАССИФИКАЦИИ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА

Согласно принятым КНМНМ ММА правилам (Johnsen et al., 2003a), выделение нового минерала в группе эвдиалита основано на кристаллохимии и на общем для всех минералов принципе доминирования нового элемента в одной или нескольких ключевых позициях. С учетом этих рекомендаций в группе эвдиалита установлено к настоящему времени 25 минеральных видов. Еще более 50 представителей — разновидностей и потенциально новых минералов — изучено методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Новые данные позволяют по-новому взглянуть на проблему классификации минералов группы эвдиалита. Обобщения кристаллохимических данных делались на разных этапах изучения эвдиалита в ряде работ (Расцветаева, 1992, 2006, 2007; Johnsen, Grice, 1999; Расцветаева, Хомяков, 2003). Однако полной кристаллохимической систематики, охватывающей все минералы группы, до настоящего времени не было.

Прежде всего следует отметить, что не существует неразрешимого противоречия между общими правилами КНМНМ ММА для выделения минеральных видов (с критерием доминирования данного элемента в данной структурной позиции) и иерархической схемой классификации. Первая попытка синтеза этих двух принципов была предпринята А. П. Хомяковым (2007). Согласно этой систематике, на первом уровне минералы делятся на две подгруппы с 12-слойными ($a \sim 14.2$, $c \sim 30$ Å) и 24-слойными ($a \sim 14.2$, $c \sim 60$ Å) структурными мотивами. Следующий уровень подразделения (подгруппы 2-го порядка) учитывает принадлежность минерала к одной из трех пространственных групп симметрии $R\bar{3}m$ (a), $R3m$ (b), $R3$ (c). Таким образом, подгруппы 2-го порядка делятся на 6 структурных надтипов: 12a (подгруппа эвдиалита), 12b (подгруппа кентбруксита), 12c (подгруппа онейллита), 24a (подгруппа аллуайвита), 24b (подгруппа расцветаевита), 24c (подгруппа лабиринтита). Эта классификация базируется на общих кристаллографических характеристиках (параметрах ячейки и симметрии), но абстрагируется от локальных кристаллохимических особенностей. Кроме того, 24-слойные минералы в большинстве своем centrosymmetric и характеризуются пр. гр. $R\bar{3}m$, а также пока не найденной $R\bar{3}$.

Еще раньше формально-иерархический подход к систематизации разнообразия эвдиалитов (основанный исключительно на их химическом составе и специально разработанный без учета тонких кристаллохимических особенностей) был опубликован в работах А. Г. Булаха и Т. Г. Петрова (2003; Bulakh, Petrov, 2004). Преимуществом формально-иерархического подхода является простота систематизации данных по химическим составам (перечисляются все компоненты в порядке убывания их содержания в атомных процентах), что удобно при компьютерной обработке больших массивов химических составов, в частности для их включения в базы данных. В то же время такая классификация не отражает ни генетической, ни структурной особенности того или иного образца.

В развитие формально-иерархической систематизации химических составов эвдиалитов были предложены названия минералов типа «эвдиалит-(CaFe)», «эвдиалит-(CaMn)» и т. п., а все их разнообразие сведено к нескольким минеральным видам с множеством химико-структурных и структурных разновидностей (Булах, 2008, 2010); одновременно были ревизованы формулы минералов с учетом правила компенсации зарядов в них.

Другие предложения по систематизации минералов группы эвдиалита, рационализации и упрощению их номенклатуры были сделаны А. А. Ярошевским и Ю. А. Багдасаровым (2007). Эти предложения также основаны на валовом химическом составе минералов, без глубокой детализации роли различных элементов в их кристаллических структурах. В результате авторы вводят названия типа «эвдиалит-(X)», где $X = \text{Na}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{NaFe}, \text{Mn}, \text{TR}, \text{NaTR}, \text{Ca} \dots$, «ниобозэвдиалит-(X)», «титан-эвдиалит-(X)» (но также и «аллуайвит», хотя это тоже титан-доминантный минерал), «гидрониобозэвдиалит». Представляется, что при таком подходе из рассмотрения выводится не только структурная, но отчасти и генетическая сущность минерального вида. Например, марганец в минералах группы эвдиалита может доминировать в позиции $M(1)$, в позиции $M(2)$ или в одной из N -позиций, что является типоморфным признаком, так как каждый из этих минералов характеризуется индивидуальными парагенетическими ассоциациями.

Можно только приветствовать попытку введения элементов рациональной номенклатуры, когда названия минералов уже сами по себе несут определенную информацию об их природе. Однако принятая в настоящее время номенклатура минералов группы эвдиалита, основанная на их кристаллохимической классификации, должна учитывать не только вариации состава, но и распределение компонентов по позициям структуры. Главной трудностью в систематике этих минералов является то обстоятельство, что по отношению к их структурам понятие изоморфизма не всегда может трактоваться в классическом (по В. Гольдшмидту) смысле, т. е. как замещение атома на атом в позиции с определенными координатами. В обобщенном смысле под изоморфизмом следует понимать, на наш взгляд, конкуренцию двух групп атомов, которые не могут находиться одновременно в данной области элементарной ячейки и таким образом происходит замещение одного блока другим, близким по размерам и форме, но имеющим иное внутреннее строение. Сама ячейка при этом сохраняется. Такое обобщение понятия «изоморфизм» было предложено В. А. Франк-Каменецким (1962, 1964) и впоследствии развито в публикациях других авторов (Булах, 1989, 1998; Булах и др., 1995; Солодовников, 2005), где, в частности, введены понятия блочного изоморфизма и сборки структур из фрагментов. Как правило, в таких фрагментах (группах атомов и ионов) можно выделить ключевой элемент, обладающий наиболее высокими силовыми характеристиками или наибольшей рассеивающей способностью.

Настоящая работа, не претендуя на развитие номенклатуры минералов группы эвдиалита, посвящена разработке удобной и (насколько это возможно для столь сложных и разнообразных в структурном отношении минералов) простой схемы кристаллохимической классификации.

КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИОННАЯ СХЕМА

Предлагаемая в данной работе (см. также: Расцветаева, Чуканов, 2009) структурно-кристаллохимическая классификация минералов группы эвдиалита использует иерархический принцип, учитывающий следующие признаки (в порядке понижения их ранга).

А. Наличие модулярного характера структуры и величину параметра c (около 30 Å для 12-слойных структур, около 60 Å для 24-слойных).

В. Симметрия, определяемая наличием или отсутствием упорядочения катионов в шестичленном кольце из реберно-связанных октаэдров, сопровождаемого распадом октаэдрической позиции кальция $M(1)$ на $M(1a)$ и $M(1b)$ и, как следствие, трансформацией кальциевого кольца в кольцо с чередованием Са-октаэдров с Mn- или Fe-центрированными октаэдрами или Mn-октаэдров с Na-октаэдрами.

С. Характер распределения различных компонентов по пяти ключевым микрорегионам:

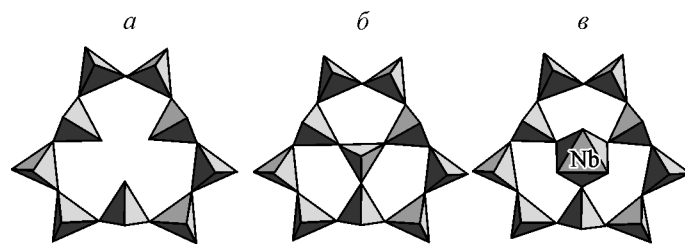


Рис. 2. Основные структурные фрагменты минералов группы эвдиалита: девятичленное кремнекислородное кольцо $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$ (а), плоский диск $[\text{Si}_{10}\text{O}_{27}(\text{OH})]$ (б), гетерополиэдрический плоский диск $[\text{Si}_9\text{O}_{27}M(\text{OH})_3]$ (в).

Fig. 2. Principal structural fragments of the eudialyte-group minerals: а) nine-member silicon-oxygen ring $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$, б) flat disk $[\text{Si}_{10}\text{O}_{27}(\text{OH})]$, в) heteropolyhedral flat disk $[\text{Si}_9\text{O}_{27}M(\text{OH})_3]$.

— плоский квадрат $M(2)\text{O}_4$ и его производные с к. ч. 5 или 6 — полиэдры $M(2)\text{O}_5$ и $M(2)\text{O}_6$, центрированные атомами Fe, Mn, Na, Zr, Ta и др. [ниже для всех «приквадратных» подпозиций мы сохраняем общее обозначение $M(2)$];

— две микрообласти вблизи центров двух 9-членных колец $M(3)$ и $M(4)$, содержащие тетраэдры (SiO_4 , редко SO_4) или октаэдры (NbO_6 , WO_6 , TiO_6 и др.);

— две наиболее изоморфноёмкие внекаркасные позиции $N(3)$ и $N(4)$ вместе с их окружением.

Д. Степень гидратированности — подразделение на минералы с $\text{Na} > (\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O})$ и $\text{Na} < (\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O})$ (в формульных единицах).

В соответствии с вышеизложенными принципами 12-слойные члены группы подразделяются на минералы с $M(1)$ -неупорядоченными (эвдиалитового типа, пр. гр. $R\bar{3}m$ или $R\bar{3}m$) и $M(1)$ -упорядоченными (онейллитового типа, пр. гр. $R3$) структурами (табл. 1, 2).

В основу второго шага подразделения структур эвдиалитового типа положен принцип центрирования 9-членных кремнекислородных колец дополнительными Si-тетраэдрами (T), $M(3)$ - и $M(4)$ -октаэдрами (M) или вакансиями (\square) или комбинациями этих вариантов (рис. 2). Таким образом, эвдиалитоподобные структуры подразделяются на структуры эвдиалита (1.1 в табл. 2), кентбруксита (1.2 в табл. 2) и т. д.

Третий шаг подразделения структур эвдиалитового типа осуществляется в зависимости от заселенности «приквадратной» позиции $M(2) = \text{Fe}$ (1.1.1) и $M(2) \neq \text{Fe}$ (1.1.2) (рис. 3), а для минералов со структурой кентбруксита — осевых октаэдров $M = \text{Nb}$ (1.2.1), W (1.2.2) и Mn (1.2.3). Дальнейшее подразделение минералов со структурой кентбруксита проведено по главному катиону в позиции $M(2)$, затем по главному катиону в позиции $N(4)$.

Разделение онейллитоподобных структур (12-слойные структуры с упорядочением $M(1)$ -катионов в октаэдрическом кольце и понижением симметрии до $R3$) на первом шаге также осуществляется на основе принципа центрирования 9-членных кремнекислородных колец. Дальнейшее подразделение этих структур дано в соответствии с различными парами катионов $M(1a) + M(1b)$.

Для 24-слойных структур минералов группы эвдиалита первое подразделение проводится по принципу гидратированности — на низководные и высоководные члены (табл. 1, 3), а последующие подразделения — с учетом состава в позициях Z -октаэдра на двух разных этажах структуры (здесь символ Z_{Zr} означает, что в аналоге позиции Z находится цирконий, а Z_{Ti} — что в этой позиции находится титан).

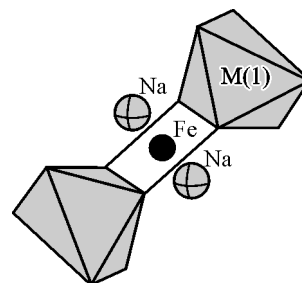


Рис. 3. Плоский «квадрат» и «приквадратная» $M(2)$ -микрообласть.

Fig. 3. Flat «square» and the «near-square» $M(2)$ micro-area.

Схема классификации структур минералов группы эвдиалита
Scheme of classification for structures of the eudialyte-group minerals

12-слойные структуры ($Z = Z_t$ для всех)					24-слойные структуры							
1. Структуры эвдиалитового типа					2. Структуры онейллитового типа ***				3. Структуры низководных членов $Na > H_2O + H_3O$		4. Структуры высоководных членов $Na < H_2O + H_3O$	
1.1 вариант ($T+T$)*	1.2 вариант ($T+M$)**	1.3 вариант ($M+M$)	1.4 вариант ($\square+T$)	1.5 вариант ($\square+\square$)	2.1 вариант ($T+T$)	2.2 вариант ($\square+T+M$)	2.3 вариант ($\square+T$)	3.1 вариант $Z_{Ti} + Z_{Ti}$	3.2 вариант $Z_{Zr} + Z_{Ti}$	3.3 вариант $Z_{Zr} + Z_{Zr}$	4.1 вариант «гидро-эвдиалиты»	

Примечание. T — тетраэдр в центре 9-членного кольца; M — октаэдр в центре 9-членного кольца; \square — вакансия в центре 9-членного кольца; Z_{Zr} — цирконий в аналоге позиции Z ; Z_{Ti} — титан в аналоге позиции Z . * Дальнейшее подразделение структур эвдиалитового типа (вариант $T+T$) может быть дано по степени гидратированности (в табл. 2 — аквалит и 4 разновидности в конце колонки) и далее по катиону в $M(2)$ -позиции. ** Дальнейшее подразделение структур эвдиалитового типа (вариант $T+M$) может быть дано по степени гидратированности (в табл. 2 — образцов в конце колонки) и далее по главному катиону в осевой $M(3)$ -позиции, затем в $M(2)$ -позиции и по главному катиону в позиции $N(4)$. *** Дальнейшее подразделение структур онейллитового типа может быть дано в соответствии с парами катионов $M(1a) + M(1b)$.

Классификация 12-слойных структур минералов группы эвдиалита и их представители
Classification of 12-layer structures of the eudialyte-group minerals and their representatives

1. Структуры типа эвдиалита					2. Структуры типа онейллита		
1.1 вариант ($T+T$)	1.2 вариант ($T+M$)	1.3 вариант ($M+M$)	1.4 вариант ($\square+T$)	1.5 вариант ($\square+\square$)	2.1 вариант ($T+T$)	2.2 вариант ($T+M$)	2.3 вариант ($\square+T$)
Эвдиалит s.s.	Кентбруксит	Цирконо-ниобосиликат	Моговидит	Икранит	Раслакит	Онейллит	Низкокальциевый образец 2676
Манганозвдиалит	Феррокентбруксит			Эвдиалит Джусепетти	Воронковит		
Гиперциркониевый образец-1	Карбокентбруксит				Низкокальциевый образец 2656		
Низкожелезистый образец-2	Андреановит				Mn, Ca -упорядоченный эвдиалит		
Низкожелезистый образец-5	Георгибарсановит				Mn, Ca -упорядоченный эвдиалит-2		

Классификация 24-слойных структур минералов группы эвдиалита
Classification of 24-layer structures of the eudialyte-group minerals

3. Низководные ($\text{Na} > \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}$)			4. Высоководные ($\text{Na} < \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}$)
3.1 структура типа аллуайвита $Z_{\text{T1}} + Z_{\text{T1}}$	3.2 структура типа дуалита $Z_{\text{Zr}} + Z_{\text{T1}}$	3.3 структура типа расцветаевита $Z_{\text{Zr}} + Z_{\text{Zr}}$	4 вариант $Z_{\text{Zr}} + Z_{\text{Zr}}$
Аллуайвит <i>Аллуайвит хибинский</i>	Дуалит	Расцветаевит Лабиринтит <i>К-деплетированный расцветаевит (образец 3765)</i> <i>Центросимметричный аналог лабиринтита</i> <i>Na,K-образец 1408</i> <i>Гипермарганцевый образец 3248</i> <i>Центросимметричный образец 3043_7</i> <i>Гидратированный образец-I</i> <i>Гидратированный образец-II</i>	<i>Гидратированный расцветаевит (образец 3369)</i>

Примечание. См. примечание к табл. 2.

Далее кратко охарактеризуем минералы, относящиеся к выделенным разделам структурно-кристаллохимической систематики.

12-слойные структуры эвдиалитового типа

Таковыми структурами обладает большинство 12-слойных минералов группы. Они характеризуются наличием шестерного кольца из эквивалентных Са-доминантных октаэдров и симметрией $R3m$ или $R\bar{3}m$. В зависимости от того, какие структурные элементы доминируют вблизи центров двух 9-членных кремнекислородных колец (Si-тетраэдры T , октаэдры M или вакансии \square), в структуре эвдиалитового типа можно выделить 4 ее варианта — собственно эвдиалитовый, кентбрукситовый, икранитовый и моговидитовый. Недавно к ним добавился пятый вариант ($M + M$), представленный высокониобиевым (и высокотитановым) образцом (Расцветаева и др., 2009b).

1. Вариант ($T + T$) реализуется в структурах высококремнистых минералов, в которых дополнительные Si-тетраэдры доминируют вблизи центров обоих 9-членных колец. Эти структуры в свою очередь можно детализировать по принципу заселения позиций $M(2)$ в центре кислородного квадрата или координационных полиэдров на его основе.

Эвдиалиты с доминированием Fe в позиции $M(2)$. В кристаллохимическом подтипе эвдиалита известен только один минеральный вид, удовлетворяющий этому условию — собственно **эвдиалит** (эвдиалит *s. s.* от лат. *sensu stricto* — в узком смысле) $\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Si}(\text{Si}_{25}\text{O}_{73})(\text{O},\text{OH},\text{H}_2\text{O})_3(\text{Cl},\text{OH})_2$ (Гольшев и др., 1971). Он содержит основные элементы в соотношениях, близких к стехиометрии — $\text{Na} : \text{Ca} : \text{Fe} : \text{Si} \sim 15 : 6 : 3 : 26$. Как следствие, позиция в центре плоского квадрата почти целиком занята Fe^{2+} , а вместо обоих 9-членных кремнекислородных колец содержатся тетраэдрические комплексные анионы из 10 тетраэдров SiO_4 . Таким образом, для эвдиалита *s. s.* характерно присутствие двухвалентного железа в квадратной координации и тетраэдрических катионов в осевых позициях $M(3)$ и $M(4)$ вблизи центров девятых кремнекислородных колец.

Эвдиалиты с доминированием Mn в позиции $M(2)$. Сюда относится **манганоэвдиалит** $\text{Na}_{14}\text{Ca}_6\text{Zr}_3[\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_2](\text{Mn},\text{Fe})_3(\text{H}_2\text{O},\text{Cl},\text{O},\text{OH})_6$ (Nomura et al., 2010), кото-

рый характеризуется высоким содержанием Mn. В «приквдратной» области доминирующим полиэдром является Mn-октаэдр, образованный четырьмя атомами O квадрата и двумя молекулами воды по обе стороны от него. Особенностью минерала является также высокое содержание воды, входящей в виде молекулы H₂O и групп OH в окружение всех «приквдратных» M(2)-полиэдров, а также в вершины осевых Si-тетраэдров и в позиции дополнительных X-анионов.

К этому же варианту (T + T) структур эвдиалитового типа относятся высококремнистые натрий-дефицитные минералы, в том числе **аквалит** (H₃O)₉ Na₂(K, Ba, Sr)₂ · Ca₆Zr₃Si₂₆O₆₆(OH)₉Cl · H₂O, обнаруженный А. П. Хомяковым в Инаглинском массиве (Южная Якутия). Минерал характеризуется высокой гидратированностью (до 10 мас. % H₂O) и чрезвычайно низким (3.5 мас. %) суммарным содержанием оксидов Na и Fe. Основной особенностью минерала (Расцветаева и др., 2002) является его высокая насыщенность оксониевыми группами, которые доминируют среди внекаркасных катионов и присутствуют во всех крупнокатионных позициях. Позже аквалит был найден нами в гидротермально переработанном пегматите другого щелочно-ультраосновного массива — Ковдорского.

2. Вариант (T + M). Минералы с такими структурами наиболее разнообразны. Если позиция M(4) на оси 3 по-прежнему занята атомами Si, в микрообласти M(3) формируется октаэдр Nb, реже W. В пределах этого варианта можно выделить минералы с доминированием в «приквдратной» позиции Mn или Fe.

Ниобиевые минералы со структурой кентбруксита, содержащие Mn в позиции M(2) — это собственно **кентбруксит** (Na, REE)₁₅(Ca, REE)₆Mn₃Zr₃Nb(Si₂₅O₇₄)F₂ · 2H₂O (Johnsen et al., 1998), его карбонатный аналог **карбокентбруксит** (Na, □)₁₂(Na, Ce)₃ · Ca₆Mn₃Fe₃Zr₃Nb[Si₂₅O₇₃](OH)₃(CO₃) · H₂O (Хомяков и др., 2003), высококалийевый минерал **андриановит** Na₁₂(K, Sr, Ce)₃Ca₆Mn₃Zr₃NbSi[Si₃O₉]₂[Si₉O₂₇]₂(O, OH)₄(H₂O, CO₃, Cl)₂ (Расцветаева, Хомяков, 2005) и редкоземельный минерал **цирсилит-(Ce)** (Na, □)₁₂(Ce, Na)₃Ca₆Mn₃Fe₃Zr₃Nb [Si₂₅O₇₃](OH)₃(CO₃) · H₂O (Хомяков и др., 2003). Все перечисленные минералы характеризуются доминированием в микрообласти M(2) полиэдров MnO₅ [в отличие от эвдиалита *s. s.*, в структуре которого в микрообласти M(2) располагается плоский координационный квадрат Fe²⁺O₄]. Пятивершинники MnO₅ соединяются вершиной с октаэдрами Nb, образуя кластеры [NbMn₃], приводящие к ацентричности структуры и появлению в некоторых случаях пьезоэффекта.

Ниобиевые минералы, содержащие Fe в позиции M(2), — это **феррокентбруксит** Na₁₅Ca₆(Fe, Mn)₃Zr₃Nb[Si₂₅O₇₃](O, OH, H₂O)₃(Cl, F, OH)₂(CO₃) · H₂O (Johnsen et al., 2003b), **фекличевит** Na₁₁Ca₉Fe₂Zr₃NbSi₂₅O₇₃(OH, H₂O, O, Cl)₅ (Расцветаева и др., 1999), **георгбарсановит** Na₁₂(Mn, REE, Sr)₃Ca₆Fe₃²⁺Zr₃NbSi₂₅O₇₆Cl₂ · H₂O (Хомяков и др., 2005), **тасекит** Na₁₂Sr₃Ca₆Fe₃Zr₃NbSi₂₅O₇₃(O, OH, H₂O)₃Cl₂ (Екименкова и др., 2000a) и **голышевит** (Na, Ca)₁₀Ca₉(Fe³⁺, Fe²⁺)₂Zr₃NbSi₂₅O₇₂(CO₃)(OH)₃ · H₂O (Чуканов и др., 2005). Фекличевит и голышевит являются примерами минералов группы эвдиалита с необычайно высоким содержанием Ca (до ~16 % CaO). Атомы кальция занимают не только октаэдрические позиции шестерного кольца, но и доминируют в позиции N(4), и таким образом минералы характеризуются наличием слоя из Ca-центрированных полиэдров, а шестерные кольца являются частью этого слоя. Эти минералы близки по строению к кентбрукситу, но в них пятивершинник занят преимущественно Fe с образованием кластеров [NbFe₃], которые подчеркивают ацентричный характер структуры (приводящий к стойкому проявлению пьезоэффекта в георгбарсановите) в отличие от близкой к центросимметричной структуры собственно эвдиалита. Различия рассмотренных десяти ниобиевых минералов касаются также заполнения позиции N(4). В кентбрукситах, феррокентбрукситах и карбокентбрукситах в ней находится Na, в тасеките преобладает Sr, в цирсилите-(Ce) — REE, а в георгбарсановите она занята Mn, Sr, Ca и рядом других катионов с доминированием Mn. В структуре андриановита в позиции N(4) находятся K, Sr и Ce, среди которых преобладает K.

Вольфрамсодержащие аналоги кентбруксита, минералы **хомяковит** N₁₂Sr₃Ca₆ · Fe₃Zr₃W[Si₂₅O₇₃](O, OH, H₂O)₃(OH, Cl)₂ (Johnsen et al., 1999a), **манганохомьяковит** N₁₂Sr₃Ca₆Mn₃Zr₃W[Si₂₅O₇₃](O, OH, H₂O)₃(OH, Cl)₂ (Johnsen et al., 1999a) и **йонсе-**

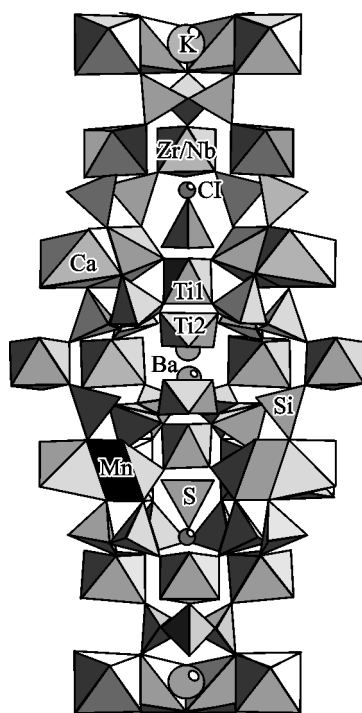


Рис. 4. Структура Zr,Nb,Ti-эвдиалита.

Fig. 4. Structure of the Zr,Nb,Ti-eudialyte.

нит-(Ce) $\text{Na}_{12}(\text{Ce}, \text{La}, \text{Sr}, \text{Ca}, \square)_3 \text{Ca}_6 \text{Mn}_3 \text{Zr}_3 \text{W}(\text{Si}_{25} \cdot \text{O}_{73})(\text{CO}_3)(\text{OH}, \text{Cl})_2$ (Grice, Gault, 2006), довольно редки и встречаются только в массиве Сент-Илер в Канаде. В их структурах содержатся полиэдрические кластеры $[\text{WFe}_3]$ или $[\text{WMn}_3]$, а позиция $N(4)$ занята атомами Sr или (в йонсените) атомами Се. Особенностью йонсенита является также содержание карбонатных групп в качестве видообразующего компонента.

3. Вариант (M + M). Такой структурой обладает недавно изученный низкокремнистый потенциально новый минерал $[\text{Na}, \text{H}_3\text{O}, \text{Ca}, \text{K}]_{15} \text{Ca}_8 [\square, \text{Mn}, \text{Fe}]_3 \cdot [\text{Zr}_{1.5} \text{Nb}_{1.5}] [\text{Si}_{24} \text{O}_{68}] (\text{O}, \text{OH})_4 [\text{Ti}_2] (\text{OH})_5 \text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Расцветаева и др., 2009) из Ковдорского флогопитового месторождения (Кольский п-ов), в котором он сформировался как трансформационный минерал по более раннему минералу группы эвдиалита. Особенностями состава являются низкое содержание циркония и высокое — ниобия и титана. Установлено, что атомы ниобия совместно с цирконием входят в октаэдрическую позицию Z каркаса, а атомы титана находятся в позициях $M(3)$ и $M(4)$ на оси

3 в центре девятичленных Si_3O -колец (рис. 4). Исследованный минерал может быть отнесен в одинаковой степени как к цирконосиликатам, так и ниобосиликатам со структурным типом эвдиалита.

4. Вариант ($\square + T$). Сюда относится один представитель, минерал **моговидит** $\text{Na}_9(\text{Ca}, \text{Na})_6 \text{Ca}_6 (\text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+})_2 \text{Zr}_3 [\text{Si}_{25} \text{O}_{72}] (\text{CO}_3) (\text{OH}, \text{H}_2\text{O})_4$ (Розенберг и др., 2005). Он характеризуется наивысшим из найденных в эвдиалитах содержанием Ca, который занимает не только октаэдрические позиции шестерного кольца (как в большинстве минералов группы эвдиалита), но и дополнительно позиции внекаркасных катионов, доминируя над натрием в $N(3)$ и $N(4)$ и образуя таким образом двойной Ca-слой.

5. Вариант ($\square + \square$). Наиболее близко к собственно эвдиалиту стоят абесонные катионами металлов образцы, которые встречаются сравнительно редко. В последнее время найдено и изучено всего 11 таких минералов, два из которых утверждены Комиссией как самостоятельные минеральные виды — икранит и аквалит. Вариант ($\square + \square$) реализуется в структуре **икранита** $(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})_{15} (\text{Ca}, \text{Mn}, \text{REE})_6 \text{Fe}_3^{3+} \text{Zr}_3 (\square, \text{Zr}) \cdot (\square, \text{Si}) \text{Si}_{24} \text{O}_{66} (\text{O}, \text{OH})_6 \text{Cl} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n = 2-3$) (Расцветаева, Чуканов, 2003). Он характеризуется преимущественной вакансионностью обеих позиций в центре 9-членного кольца — $M(3)$ и $M(4)$. Согласно данным мёссбауэровской спектроскопии, 84.56 % железа в икраните находится в трехвалентном состоянии, что хорошо согласуется с результатами химического анализа. Другой представитель 12-слойных ($\square + \square$)-минералов со структурами эвдиалитового типа — это «эвдиалит» **Джузеппетти** $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn}, \text{Mg})_3 \text{Zr}_3 (\text{Zr}, \text{Nb})_x (\text{Ca}, \text{REE})_6 \text{Na}_{12} [\text{Si}_y \text{O}_{27-y} \text{OH}_y]_2 [\text{Si}_3 \text{O}_9]_2 \text{Cl}_2$ (Giuseppetti

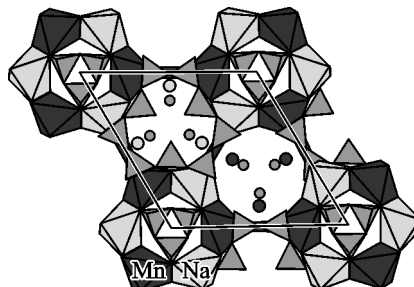


Рис. 5. Упорядочение Na и Mn в октаэдрах шестичленного кольца структуры воронковита.

Fig. 5. Ordering of Na and Mn in octahedra of the six-membered ring in structure of voronkovite.

et al., 1971). Его структура описывается центросимметричной группой $R\bar{3}m$. В центре девятичленных колец располагаются дополнительные атомы Zr, которые совместно с Nb составляют лишь 0.6 атома из максимально возможного количества 2 на независимую часть ячейки. Принимая во внимание доминирование вакансий в обеих внутрикольцевых позициях $M(3)$ и $M(4)$, мы поместили минерал в классификационной таблице рядом с икранитом.

12-слойные структуры онейллитового типа

В большинстве эвдиалитов либо содержится около 6 атомов Ca (в расчете на формулу, $Z = 3$), необходимых и достаточных для построения октаэдрического кольца, либо несколько пониженное количество Ca сопровождается изоморфным замещением этого элемента марганцем, натрием, редкоземельными элементами и др. Но значительный дефицит кальция в некоторых минералах приводит к трансформации шестичленных колец. В низкокальциевых минералах $M(1)$ -катионы упорядочиваются по чередующимся позициям $M(1a)$ и $M(1b)$, однородное шестичленное кольцо распадается на две тройки неэквивалентных по составу и размеру октаэдров, вследствие чего пропадает плоскость m , и симметрия понижается до $R\bar{3}$.

1. Вариант ($T + T$). Сюда относятся два минеральных вида — раслакит и воронковит. В $M(1)$ -октаэдрах шестичленного кольца структуры **раслакита** $Na_{15}Ca_3Fe_3 \cdot (Na,Zr)_3Zr_3(Si,Nb)(Si_{25}O_{73})(OH,H_2O)_3(Cl,OH)$ (Екименкова и др., 2000б) установлено упорядочение Ca и Fe. Особенно интересный пример трансформации шестичленных колец демонстрирует **воронковит** с упрощенной формулой $Na_{15}(Na,Ca,Ce)_3(Mn,Ca)_3 \cdot Fe_3Zr_3Si_{26}O_{72}(OH,O)_4Cl \cdot H_2O$, найденный А. П. Хомяковым в Ловозерском массиве Кольского п-ва. В структуре воронковита (Расцветаева и др., 2000) Ca не доминирует ни в одном из октаэдров, а его замещают такие разнотипные катионы, как Mn и Na (1-я и 2-я скобки формулы). В результате присутствия двух наиболее контрастных по объему октаэдров (среднее расстояние Mn—O составляет 2.22, а Na—O — 2.45 Å) вместо кольцевого радикала образуются три изолированных Mn-октаэдра, которые объединяются тремя Na-центрированными октаэдрами (рис. 5), а также атомами Na в полиэдрах $N(3)$ и $N(4)$ в единый слой. Другой особенностью воронковита является его высокая кремнеземистость со статистически разориентированными дополнительными Si-тетраэдрами.

2. Вариант ($T + M$). Этот вариант реализуется в **онейллите** $Na_{15}Ca_3Mn_3 \cdot Zr_3Nb(Si_{25}O_{73})(O,OH,H_2O)_3(Cl,OH)_2$ (Johnsen et al., 1999b) из массива Сент-Илер (Квебек, Канада). Его структура характеризуется наличием двух видов дисковидных «платформ»: платформой из десяти Si-тетраэдров и платформой из девяти Si-тетраэдров и одного M -октаэдра. В шестичленном кольце онейллита Ca-октаэдры (среднее Ca—O = 2.43 Å) чередуются с Mn-центрированными октаэдрами (среднее Mn—O = 2.23 Å). Центры 9-членных колец занимают Nb-октаэдр и Si-тетраэдр соответственно. На базе квадрата в 5-вершиннике располагаются атомы Fe.

Структуры низководных 24-слойных минералов

Здесь различаются структуры с разной заселенностью Z -октаэдров атомами Zr или Ti.

1. Структура аллуйвита (вариант $Z_{Ti} + Z_{Ti}$). Найденный А. П. Хомяковым в Ловозерском массиве Кольского полуострова **аллуйвит** $(Ti_{2.3}Nb_{0.7})(Ca_{4.5} \cdot Mn_{1.5})(Na_{19.1}Sr_{0.3}REE_{0.1})[Si_3O_9]_2[Si_{10}O_{28}]_2[Cl_{0.8}(H_2O)_{1.6}K_{0.1}]$ стал первым титановым представителем группы эвдиалита. Отсутствие в минерале железа при избытке Na делает возможным размещение части катионов Na в промежутке между двумя Ca-центрированными октаэдрами двух соседних колец (плоском квадрате и в приквдратных позициях), и найденная впервые (Расцветаева и др., 1990) линейная группировка из трех

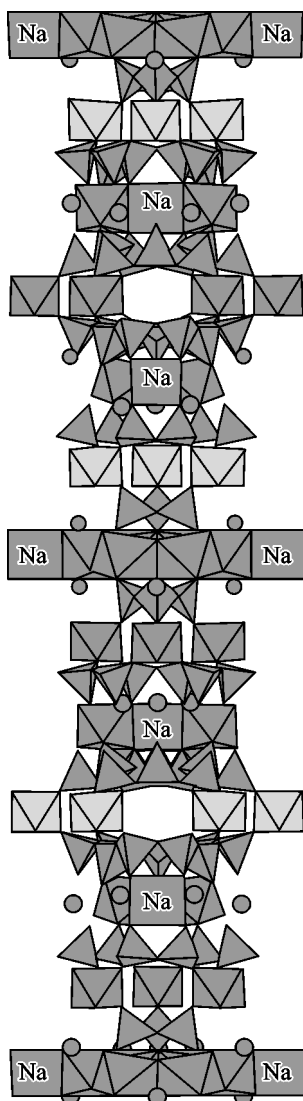


Рис. 6. Структура дуалита.

Fig. 6. Structure of dualite.

Ti Na-центрированных полиэдров (двух семивершинников и позиции между ними с квадратной координацией) является своеобразной «визитной карточкой» этого минерала. Особенностью этого титаносиликата является также полная заселенность центров девятерных колец дополнительными атомами Si, которые в каждой паре колец одинаково ориентированы вдоль оси 3. Наличие 12 (на всю ячейку) дополнительных тетраэдров кремния приводит к полной трансформации 9-членных колец $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]^{18-}$ в 10-членные дисковые радикалы $[\text{Si}_{10}\text{O}_{28}]^{16-}$.

2. Структура дуалита (вариант $Z_{\text{Zr}} + Z_{\text{Ti}}$). Единственным представителем является **дуалит** $\text{Na}_{30} \cdot (\text{Ca}, \text{Na}, \text{Ce}, \text{Sr})_{12} (\text{Na}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ti})_6 \text{Zr}_3 \text{Ti}_3 \text{MnSi}_{51} \text{O}_{144} (\text{OH}, \cdot \text{H}_2\text{O}, \text{Cl})_9$, найденный А. П. Хомяковым в том же Ловозерском массиве. Этот циркониевый минерал с высоким содержанием Ti получил свое название от латинского «dualis» — двоякий, что отвечает главной его особенности: в удвоенной ячейке вдоль оси 3 чередуются октаэдры, в которых доминируют Zr и Ti соответственно (Rastsvetaeva et al., 1999) (рис. 6).

3. Структура расцветаевита (вариант $Z_{\text{Zr}} + Z_{\text{Zr}}$). **Расцветаевит** $\text{Na}_{27} \text{K}_8 \text{Ca}_{12} \text{Fe}_3 \text{Zr}_6 \text{Si}_4 [\text{Si}_3\text{O}_9]_4 [\text{Si}_9\text{O}_{27}]_4 \cdot (\text{O}, \text{OH}, \text{H}_2\text{O})_6 \text{Cl}$ найден А. П. Хомяковым на горе Расвумчорр Хибинского массива (Кольский п-ов). Он характеризуется аномально высоким содержанием калия. Главной причиной удвоения периода *c* (Расцветаева, Хомяков, 2001а) является наличие двух разных по составу и строению типов катионных слоев (модулей) — аллуайвитоподобного и эвдиалитоподобного. Для первого слоя основной кристаллохимической спецификой является наличие К-доминантных позиций *N*(6) и *N*(7) (с заселенностью 67 % каждая) и полное отсутствие атомов Fe, позиция которых в центре кислородного «квадрата» на стыке колец $[\text{Ca}_6\text{O}_{24}]$ занята атомами Na (с 33%-ной заселенностью). Атомы железа целиком сосредоточены во втором слое. Катионный слой этого модуля наряду с планарной группой $[\text{FeO}_4]$ содержит полуоктаэдры $[\text{FeO}_5]$ и $[\text{MnO}_5]$, характерные для структур кентбруксита и целого ряда других представителей группы эвдиалита. Относительное содержание в структуре расцветаевита компонентов структур аллуайвита, эвдиалита и кентбруксита составляет около 50, 40 и 10 % соответственно. «Разбухание» аллуайвитового слоя в структуре расцветаевита связано главным образом с существенно калиевым составом катионов, локализующихся в цеолитных полостях этого слоя, и объясняет не свойственную типичному эвдиалиту способность расцветаевита к гидратации и выщелачиванию натрия при обработке водой, а также широкое распространение в Хибинах его гидратных аналогов.

К минералам со структурой расцветаевита относится также лабиринтит $(\text{Na}, \text{Sr}, \text{K})_{35} \text{Ca}_{12} \text{Fe}_3 \text{Zr}_6 [\text{Si}_{52}\text{O}_{144}] (\text{O}, \text{OH}, \text{H}_2\text{O})_9 \text{Cl}_3$, обнаруженный А. П. Хомяковым на горе Ньюкпахк Хибинского массива. Минерал характеризуется понижением симметрии до *R3* (Расцветаева, Хомяков, 2001в) по сравнению с обычной для эвдиалитов пр. гр. *R3m*, а также существенно повышенным содержанием натрия и пониженным — железа (2.7 мас. % FeO против обычных 5—7 %). Основной особенностью

«аллуайвитового» фрагмента являются его высокая насыщенность натрием в целом и присутствие группировки из трех Na-центрированных полиэдров: двух семивершинников и одной позиции между ними с квадратной координацией. Другой особенностью аллуайвитового катионного слоя является полная заселенность центров девятёрных колец дополнительными атомами Si, которые одинаково ориентированы вдоль оси Z, но в противоположную сторону по отношению к Si-тетраэдрам эвдиалитового модуля, что также является причиной удвоения периода вдоль этой оси. Эвдиалитовый модуль, для которого характерно присутствие Fe в квадратной координации, статистически на ~25 % дополняется «кентбрукситовым», содержащим пятивершинники MnO_5 , однако с заменой осевого ниобиевого октаэдра октаэдром TiO_6 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно отметить, что предложенный кристаллохимический подход к систематике минералов группы эвдиалита позволяет охарактеризовать в едином ключе все представители группы, а также предсказать открытие новых минералов и их разновидности. Это важно с точки зрения реконструкции условий минералообразования, в том числе локальных, а также может представлять значительный практический интерес, если учесть наличие ионообменных свойств у эвдиалитоподобных минералов, а также их способность концентрировать редкие элементы. Несомненно, будет расти число мест находок минералов группы эвдиалита, а по мере накопления новых фактов и появления новых минералов будет расширяться и изменяться их систематика. Например, для 12-слойных структур эвдиалитового типа нами выделены пять вариантов заселения позиций $M(3)$ и $M(4)$, а шестой ($\square + M$) пока остается гипотетическим. То же самое возможно и для структур онейллитового типа, где в настоящее время три варианта заселения позиций вблизи центров 9-членных тетраэдрических колец являются лишь гипотетическими.

Совершенствование физических методов изучения вещества в последние десятилетия способствовало быстрому росту количества минеральных видов: ежегодно КНМНК ММА утверждает более 50 новых минералов. Опыт введения рациональных принципов в систематику и номенклатуру минералов группы эвдиалита может быть полезен при разработке номенклатуры для других групп, отличающихся сложными механизмами изоморфных замещений в нескольких структурных позициях.

Авторы благодарны А. Г. Булаху за полезную дискуссию по существу вопроса и большую работу по редактированию настоящей статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 10-05-00092, 09-05-12001-офи_м), а также гранта ведущей научной школы НШ-3848.2010.5.

Список литературы

- Белов Н. В. Очерки по структурной минералогии. М.: Недра, 1976. 344 с.
Булах А. Г. Минералогия с основами кристаллографии. Учебник. М.: Недра, 1989. 350 с.
Булах А. Г. Микромир минералов: границы, объекты, явления // ЗВМО. 1998. № 5. С. 124—134.
Булах А. Г. Химические, структурные и химико-структурные разновидности минералов и еще раз о путях рационализации минералогической номенклатуры // ЗРМО. 2008. № 1. С. 101—103.
Булах А. Г. Минералы в природе и «на бумаге»: история Комиссий по новым минералам в России и в ММА и принципы классификации и номенклатура минералов // ЗРМО. 2010. № 1. С. 50—61.
Булах А. Г., Петров Т. Г. Химическое разнообразие минералов группы эвдиалита, их ранговые формулы и химико-структурные разновидности минеральных видов // ЗВМО. 2003. № 4. С. 1—17.
Булах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарёв А. А. Формулы минералов. Термодинамический анализ в минералогии и геохимии. Практическое руководство и справочник. СПб.: СПбГУ, 1995. 254 с.
Гольшев В. М., Симонов В. И., Белов Н. В. О кристаллической структуре эвдиалита // Кристаллография. 1971. Т. 16. Вып. 1. С. 93—98.

- Екименкова И. А., Расцветова Р. К., Хомяков А. П. Уточнение кристаллической структуры Fe, Sr-аналога кентбруксита // Кристаллография. **2000a**. Т. 45. № 6. С. 1010—1013.
- Екименкова И. А., Расцветова Р. К., Чуканов Н. В. Упорядочение кальция и железа в минерале группы эвдиалита с симметрией $R3$ // Докл. РАН. **2000b**. Т. 374. № 3. С. 352—355.
- Расцветова Р. К. Сравнительная кристаллохимия изоморфного ряда эвдиалита. Структурная кристаллография (к 100-летию Н. В. Белова). М.: Наука, **1992**. С. 204—220.
- Расцветова Р. К. Микропористые минералы со структурным типом эвдиалита // Вестник НГУ. Серия Физика твердого тела. **2006**. Вып. 1 (9). С. 31—39.
- Расцветова Р. К. Структурная минералогия группы эвдиалита // Кристаллография. **2007**. Т. 52. № 1. С. 50—67.
- Расцветова Р. К., Хомяков А. П. Кристаллохимическая структура нового Mn, Na-упорядоченного аналога эвдиалита с симметрией $R3$ // Кристаллография. **2000**. Т. 45. № 4. С. 649—653.
- Расцветова Р. К., Хомяков А. П. Модулярная структура высококальциевого аналога эвдиалита с удвоенным c -периодом // Кристаллография. **2001a**. Т. 46. № 4. С. 715—721.
- Расцветова Р. К., Хомяков А. П. Модулярная структура высоконатриевого аналога эвдиалита с удвоенным c -периодом и симметрией $R3$ // Кристаллография. **2001b**. Т. 46. № 5. С. 827—832.
- Расцветова Р. К., Хомяков А. П. Особенности структуры Na, Fe-декационированного эвдиалита с симметрией $R3$ // Кристаллография. **2002**. Т. 47. № 3. С. 267—271.
- Расцветова Р. К., Хомяков А. П. Кристаллохимия модулярных эвдиалитов // Кристаллография. **2003**. Т. 48. № 6 (Приложение). С. S78—S90.
- Расцветова Р. К., Хомяков А. П. Кристаллическая структура K-аналога кентбруксита // Докл. РАН. **2005**. Т. 403. № 5. С. 636—639.
- Расцветова Р. К., Чуканов Н. В. Икранит: особенности состава и строения нового минерала группы эвдиалита // Кристаллография. **2003**. Т. 48. № 5. С. 775—778.
- Расцветова Р. К., Чуканов Н. В. Кристаллохимическое разнообразие группы эвдиалита: современные воззрения // Сборник докладов Международного минералогического семинара «Минералогическая интервенция в микро- и наномир». Сыктывкар, **2009**. С. 64—67.
- Расцветова Р. К., Хомяков А. П., Андрианов В. И., Гусев А. И. Кристаллическая структура аллуявита // Докл. АН СССР. **1990**. Т. 312. № 6. С. 1379—1383.
- Расцветова Р. К., Екименкова И. А., Пеков И. В. Кристаллическая структура нового высококальциевого аналога эвдиалита // Докл. РАН. **1999**. Т. 368. № 5. С. 636—638.
- Расцветова Р. К., Аксенов С. М., Чуканов Н. В. Кристаллохимия Zr, Nb-силиката с Ti-центрированными кольцами Si_9O_{27} — нового представителя группы эвдиалита // Сборник тезисов V Национальной кристаллохимической конференции, Казань, 29 ноября—4 декабря 2009. С. 146.
- Розенберг К. А., Расцветова Р. К., Чуканов Н. В., Верин И. А. Кристаллическая структура ниобийдефицитного карбонатного аналога фекличевита // Докл. РАН. **2005**. Т. 400. № 5. С. 640—644.
- Солодовников С. Ф. Основные термины и понятия структурной кристаллографии и кристаллохимии. Новосибирск: Изд-во ИНХ СО РАН, **2005**. 114 с.
- Франк-Каменецкий В. А. Природа структурных микропримесей в минералах (исследования в области нормальных и аномальных явлений изоморфизма) // Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Л.: Изд-во ЛГУ, **1962**.
- Франк-Каменецкий В. А. Природа структурных микропримесей в минералах. Л.: Изд-во ЛГУ, **1964**.
- Хомяков А. П. Кристаллохимическая систематика минералов группы эвдиалита // Труды Третьего Международного симпозиума «Минеральное разнообразие. Исследование и сохранение. Национальный музей „Земля и люди“». София, **2007**. С. 257—264.
- Хомяков А. П., Дусматов В. Д., Феррарис Дж. и др. Цирсилит-(Ce) $(Na, \square)_{12}(Ce, Na)_3Ca_6Mn_3Zr_3Nb \cdot [Si_{25}O_{73}](OH)_3(CO_3) \cdot H_2O$ и карбокентбруксит $(Na, \square)_{12}(Na, Ce)_3Ca_6Mn_3Zr_3Nb[Si_{25}O_{73}](OH)_3(CO_3) \cdot H_2O$ — новые минералы группы эвдиалита и щелочного массива Дара-и-Пиоз, Таджикистан // ЗВМО. **2003**. № 5. С. 40—51.
- Хомяков А. П., Нечелюстов Г. Н., Екименкова И. А., Расцветова Р. К. Георгбарсановит $Na_{12}(Mn, Sr, REE)_3Ca_6Fe^{2+}Zr_3NbSi_{25}O_{76}Cl_2 \cdot H_2O$ — минеральный вид группы эвдиалита: реабилитация барсановита и новое название минерала // ЗРМО. **2005**. № 6. С. 47—56.
- Чуканов Н. В., Моисеев М. М., Расцветова Р. К. и др. Гольшевит $(Na, Ca)_{10}Ca_9(Fe^{3+}, Fe^{2+})_2 \cdot Zr_3NbSi_{25}O_{72}(CO_3)(OH)_3 \cdot H_2O$ и моговидит $Na_9(Ca, Na)_6Ca_6(Fe^{3+}, Fe^{2+})_2Zr_3Si_{25}O_{72}(CO_3)(OH, H_2O)_4$ — новые минералы группы эвдиалита из высококальциевых апаитовых пегматитов Ковдорского массива, Кольский полуостров // ЗРМО. **2005**. № 6. С. 36—47.
- Ярошевский А. А., Багдасаров Ю. А. О принципах выделения новых минеральных видов и их названий (некоторые соображения по поводу названий минералов) // ЗРМО. **2007**. № 5. С. 114—124.
- Bulakh A. G., Petrov T. G. Chemical variability of eudialyte-group minerals and their sorting // N. Jb. Miner. Mh. **2004** (3). S. 127—144.
- Giuseppetti G., Mazzi F., Tadini Garla. The crystal structure of eudialyte // Tsherm. Miner. Petrogr. Mitt. **1971**. Vol. 16. P. 105—127.

Grice J. D., Gault R. A. Johnsenite-(Ce): a new member of the eudialyte group from Mont Saint-Hilaire, Quebec, Canada // *Canad. Miner.* **2006**. Vol. 44. P. 105—115.

Johnsen O., Grice J. D. The crystal chemistry of the eudialyte group // *Canad. Miner.* **1999**. Vol. 37. N 4. P. 865—891.

Johnsen O., Grice J. D., Gaulf A. Kentbrooksite from the Kangerdlugssuaq intrusion, East Greenland, a new Mn-REE-Nb-F end-member in a series within the eudialyte group: description and crystal structure // *Eur. J. Miner.* **1998**. Vol. 10. P. 207—219.

Johnsen O., Gault R. A., Grice J. D., Ercit T. S. Khomyakovite and mangan khomyakovite, two new members of eudialyte group from Mont Saint-Hilaire, Quebec, Canada // *Canad. Miner.* **1999a**. Vol. 37. N 4. P. 893—899.

Johnsen O., Grice J. D., Gaulf R. A. Oneillite: A new Ca-deficient and REE-rich member of the eudialyte group from Mont Saint-Hilaire, Quebec, Canada // *Canad. Miner.* **1999b**. Vol. 37. P. 1111—1117.

Johnsen O., Ferraris G., Gault R. A. et al. The nomenclature of eudialyte-group minerals // *Canad. Miner.* **2003a**. Vol. 41. P. 785—794.

Johnsen O., Gault R. A., Grice J. D., Ercit T. S. Ferrokentbrooksite, a new member of the eudialyte group from Mont Saint-Hilaire, Quebec, Canada // *Canad. Miner.* **2003b**. Vol. 41. P. 55—60.

Nomura S. F., Atencio D., Chukanov N. V., Rastsvetaeva R. K., Coutinho J. M. V., Karipidis T. K. Manganoeudialyte, a new mineral from Pococ de Caldas, Minas Gerais, Brazil // *ЗРМО*. **2010**. № 4. С. 35—47.

Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P., Chapuis G. Crystal structure and crystal-chemical features of a new Ti-rich member of the eudialyte family // *Zs. Krist.* **1999**. Vol. 214. P. 271—278.

Поступила в редакцию
9 февраля 2010 г.