



## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 548.736.6

DOI: 10.19110/geov.2020.1.1

### СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНО НОВОГО МИНЕРАЛА ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА ИЗ ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Р. К. Расцветаева<sup>1</sup>, Н. В. Чуканов<sup>2, 3</sup>, И. В. Пеков<sup>3</sup>, Д. А. Варламов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва  
*rast@crys.ras.ru*

<sup>2</sup>Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

<sup>3</sup>Московский государственный университет, Москва

<sup>4</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

Методами рентгеноструктурного анализа, электронно-зондового микроанализа и ИК-спектроскопии исследован потенциально новый представитель группы эвдиалита. Параметры элементарной тригональной ячейки:  $a = 14.198(1)$ ,  $c = 30.380(1)$  Å,  $V = 5303.9(1)$  Å<sup>3</sup>, пр. гр.  $R\bar{3}m$ . Кристаллическая структура уточнена до итогового фактора расходимости  $R = 4.2\%$  в анизотропном приближении атомных смещений с использованием 3174 рефлексов с  $F > 3\sigma(F)$ . Идеализированная формула минерала ( $Z = 3$ ):  $(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})_{13}(\text{Ca}_4\text{Mn}_2)\text{Zr}_3(\text{Na}_2\text{Zr})[\text{Si}_{26}\text{O}_{72}](\text{OH})_2\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$ . Обсуждаются особенности распределения состава по ключевым позициям и замещение  $\text{Fe}^{2+}$  на  $\text{Na}^+$  в  $M2$ -микрообласти.

**Ключевые слова:** эвдиалит, кристаллическая структура, минеральный вид,  $M2$ -ключевая позиция, Ловозерский щелочной массив.

### STRUCTURAL FEATURES OF POTENTIAL NEW MINERAL OF EUDIALYTE GROUP FROM THE LOVOZERO MASSIF, KOLA PENINSULA

R. K. Rastsvetaeva<sup>1</sup>, N. V. Chkanov<sup>2, 3</sup>, I. V. Pekov<sup>3</sup>, D. A. Varlamov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Shubnikov Institute of Crystallography FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Moscow

<sup>2</sup>Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka

<sup>3</sup>Moscow State University, Moscow

<sup>4</sup>Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka

A potentially new representative of the eudialyte group from the Lovozero massif, which differs from all known minerals of the eudialyte group by a number of chemical and structural features has been investigated using electron microprobe analyses, single-crystal X-ray diffraction and IR spectroscopy. The mineral is trigonal, space group  $R\bar{3}m$ ; the unit cell parameters are  $a = 14.198(1)$  Å,  $c = 30.380(1)$  Å, and  $V = 5303.9(1)$  (1) Å<sup>3</sup>. The crystal structure is refined, to final reliability factor  $R = 4.2\%$  in the anisotropic approximation of atomic displacements using 3174 reflections with  $F > 3\sigma(F)$ . The crystal-chemical formula of the potentially new mineral ( $Z = 3$ ) is  $\text{Zr}_3[\text{Ca}_{3.9}\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.9}][\text{Na}_{10.38}(\text{H}_3\text{O}, \text{H}_2\text{O})_{2.79}\text{Ce}_{0.45}\text{Sr}_{0.4}\text{K}_{0.2}][\text{Na}^{\text{VII}}_{2.13}\text{Zr}^{\text{V}}_{0.87}][\text{Si}_{24}\text{O}_{72}][\text{Si}_{1.48}\text{Ti}_{0.31}\text{Nb}_{0.21}](\text{OH})_{2.9}(\text{H}_2\text{O})_{1.26}(\text{Cl}, \text{S})_{0.94}$ . The idealized formula is  $(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})_{13}(\text{Ca}_4\text{Mn}_2)\text{Zr}_3(\text{Na}_2\text{Zr})[\text{Si}_{26}\text{O}_{72}](\text{OH})_2\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$ . Specific features of cation distribution over key sites including substitution of  $\text{Fe}^{2+}$  with  $\text{Na}$  at the  $M2$  site are discussed. The data obtained are in a good agreement with the IR spectrum of the potentially new mineral which shows characteristic bands corresponding to stretching vibrations of  $\text{Zr}^{\text{V}}\text{—O}$  bonds,  $\text{H}_2\text{O}$  molecules and  $\text{H}_3\text{O}^+$  cations as well as strong band corresponding to  $\text{SiO}_4$  tetrahedra at the  $M3$  and  $M4$  sites. A short review of crystal structures of Na-dominant (at the  $M2$  site) eudialyte-group minerals is given. It is concluded that these minerals are specific accessory components of highly alga-paite magmatic rocks (hyperalkaline foyaites) and pegmatites.

**Keywords:** eudialyte, crystal structure, mineral species,  $M2$ -key site, Lovozero alkaline massif.

**Для цитирования:** Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Пеков И. В., Варламов Д. А. Структурные особенности потенциально нового минерала группы эвдиалита из Ловозерского массива (Кольский полуостров) // Вестник геонаук. 2020. 1(301). С. 3—7. DOI: 10.19110/geov.2020.1.1.

**For citation:** Rastsvetaeva R. K., Chkanov N. V., Pekov I. V., Varlamov D. A. Structural features of potential new mineral of eudialyte group from the Lovozero massif, Kola peninsula. Vestnik of Geosciences. 2020. 1(301). Pp. 3—7. DOI: 10.19110/geov.2020.1.1.

## Введение

Ровно двести лет назад был открыт один из главных цирконосиликатных минералов — эвдиалит [12]. Немецкий химик Фридрих Штрмейер выполнил химические анализы нескольких образцов, присланных ему из Гренландии, и доложил о результатах 13 ноября 1819 года на заседании собрания Королевского научного общества [13]. Один из изученных минералов он назвал «эвдиалитом» (от греческого *eu dialutoz* — «легко разлагаемый»), потому что он легко разлагался в кислоте без нагревания, образуя желатин. Несмотря на то, что этот минерал по внешнему виду похож на гранат, особенно на «гренландский пироп», Штрмейер понял, что это новый минерал.

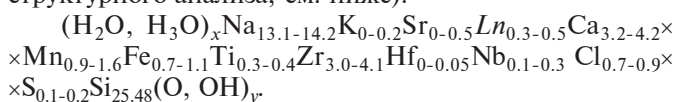
Так началась история исследования эвдиалита, которая продолжается и в настоящее время. Хотя первоначально эвдиалит был открыт в Гренландии, со временем выяснилось, что он широко распространен и в других регионах мира. Многочисленные находки этого минерала сделаны уже в десятках щелочных массивов, а большинство крупных месторождений эвдиалита расположено на территории России и связано с Хибино-Ловозерским щелочным комплексом на Кольском полуострове. Эвдиалит оказался весьма эффективной моделью, на которой были установлены многие кристаллохимические, геохимические и генетические закономерности. Кристаллохимическое разнообразие минералов со структурами, производными от эвдиалитовой, не укладывается в понятие единого минерального вида. В настоящее время группа эвдиалита насчитывает 29 минеральных видов [7]. В данной работе представлен еще один потенциально новый минерал, который отличается от известных минералов группы эвдиалита рядом химических и структурных особенностей.

## Объект, методы и результаты исследования

Изученный в настоящей работе минерал (образец Кдк-6626) найден в подземной выработке на участке Кедькверпахк рудника Карнасурт. Он образует светло-красные прозрачные зерна неправильной формы до 1.5 мм в поперечнике в ультраагпаитовом фойяите близ контакта с рудным пластом лопаритового малиньита. Эта разновидность фойяита состоит в основном из калиевого полевого шпата, нефелина, содалита и эгирина, а главными аксессуарными минералами выступают представители группы эвдиалита, лампрофиллит, ломоносовит, лопарит и заполняющий интерстиции между зернами силикатов виллиомит.

Исследование химического состава образца Кдк-6626 проводилось методом рентгеноспектрального микроанализа с применением растрового электронного микроскопа Tescan Vega-II XMU (режим EDS, 20 кВ, 400 пА) и использованием системы регистрации рентгеновского излучения и расчёта состава образца INCA Energy 450. Диаметр электронного пучка составил 157–180 нм. Время накопления сигнала составляло 100 секунд.

Особенностью образца Кдк-6626 является низкое содержание кальция и железа при неоднородности распределения компонентов по кристаллу, что приводит к следующей эмпирической формуле, рассчитанной на 25.48 атомов кремния (в соответствии с данными рентгеноструктурного анализа, см. ниже):



ИК-спектр образца Кдк-6626, запрессованного в таблетку с KBr (рис. 1), снят на фурье-спектрометре ALPHA FTIR (Bruker Optics, Германия) в диапазоне волновых чисел 360–3800  $\text{cm}^{-1}$ , при разрешающей способности 4  $\text{cm}^{-1}$  и числе сканирований, равном 16. В качестве образца сравнения использовалась аналогичная таблетка из чистого KBr.

В ИК-спектре минерала присутствуют полосы валентных колебаний  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{H}_3\text{O}$  (при 3610 и 3325  $\text{cm}^{-1}$  соответственно). Высокая интенсивность полосы при 933  $\text{cm}^{-1}$  указывает на высокое содержание тетраэдров  $\text{SiO}_4$ , центрирующих девятичленные кольца (позиции M3 и M4). Полосы в диапазоне 520–550  $\text{cm}^{-1}$ , относящиеся к Fe-O- и Mn-O-валентным колебаниям с участием катионов в позиции M2, имеют пониженную интенсивность по сравнению с аналогичными полосами в ИК-спектрах эвдиалита и манганоевдиалита.

Рентгеноструктурный анализ минерала проводился на основе данных монокристалльного эксперимента, полученного на дифрактометре Xcalibur Oxford Diffraction, оснащённом CCD-детектором (MoK $\alpha$ -излучение). Параметры тригональной ячейки:  $a = 14.198(1)$ ,  $c = 30.380(1)$  Å,  $V = 5303.9(1)$  Å<sup>3</sup>, пр. гр.  $R3m$ . В уточнении структуры использовались 3174 рефлекса с  $F > 3\sigma(F)$ , финальный R-фактор уточнения составил 4.2 %. Все расчёты выполнены по комплексу программ AREN [1].

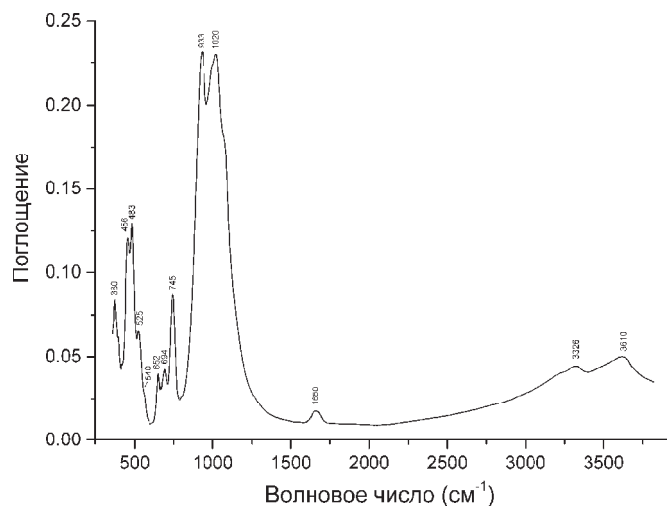


Рис. 1. ИК-спектр образца Кдк-6626

Fig. 1. IR spectrum of the sample Kdk-6626

## Обсуждение результатов

### Характеристика минералов со структурным типом эвдиалита

Минералы группы эвдиалита (МГЭ) характеризуются сложным химическим составом и могут содержать в значимых количествах более 30 элементов. Структурная сложность эвдиалита уникальна для минералов. Кроме Zr-октаэдра в этой структуре содержатся три кольцевых фрагмента: два типа колец из кремнекислородных тетраэдров — трехчленное ( $\text{Si}_3\text{O}_9$ ) и уникальное девятичленное ( $\text{Si}_9\text{O}_{27}$ ) (рис. 2, а), а также необычное шестичленное кольцо из Ca-октаэдров — соединенных общими ребрами (рис. 2, б).

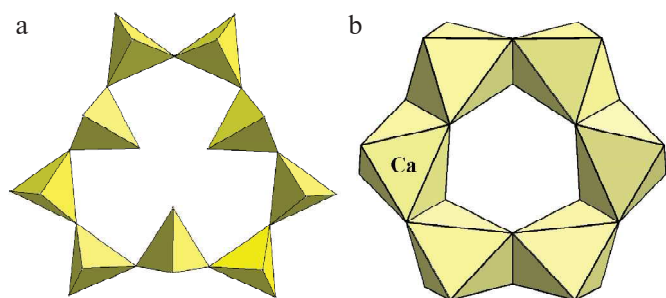


Рис. 2. Уникальные кольца в структуре эвдиалита: девятичленное из кремнекислородных тетраэдров  $[Si_9O_{27}]$  (a) и шести-членное из Ca-октаэдров (b)

Fig. 2. Unique rings in the eudialyte structure: nine-membered ring composed of silicon-oxygen tetrahedra  $[Si_9O_{27}]$  (a) and six-membered ring composed of Ca octahedra (b)

Разнообразие фрагментов в структуре МГЭ увеличивается за счет трансформаций двух неэквивалентных колец  $[Si_9O_{27}]$  в 10-членные диски при статистическом заселении середины кольца различными катионами в тетраэдрической (рис. 3, a) или же октаэдрической (рис. 3, b) координации. Позиции этих катионов находятся на оси третьего порядка, и в литературе их принято обозначать как *M3* и *M4* соответственно.

Фрагменты, расположенные между шестичленными кольцами, также топологически различны. Это плоский квадрат (для позиции *M2a*) (рис. 4, a), который встречается в минералах крайне редко, а также тетрагональная пирамида (*M2b*) (рис. 4, б), либо октаэдр (*M2c*) (рис. 4, c), построенные на базе этого квадрата, или же более крупные полиэдры.

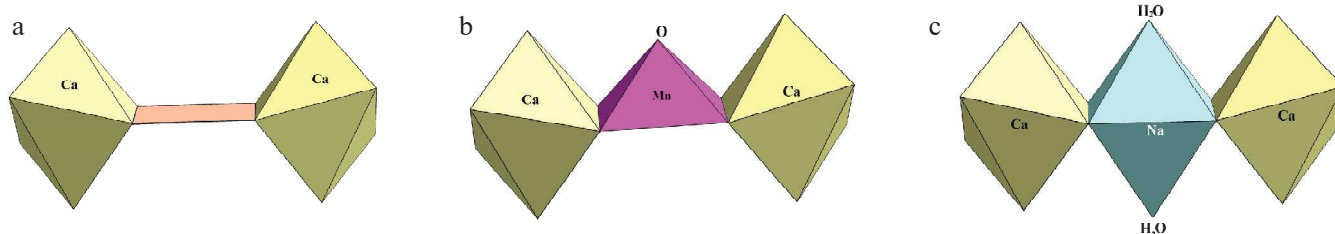


Рис. 4. Полиэдры в структуре МГЭ: квадрат (a), тетрагональная пирамида (b), октаэдр (c)

Fig. 4. The polyhedra in the structures of eudialyte-group minerals: square (a), tetragonal pyramid (b) and octahedron (c)

Перечисленные выше элементы соединяются между собой либо непосредственно, либо через изолированный октаэдр  $ZrO_6$  (реже  $TiO_6$ ), образуя, таким образом, гетерополиэдрический каркас. Кроме того, в структуре есть пять типов полостей (*M1-M5*), занимаемых крупными катионами — Na, K, Sr, *REE* и другими, а также водородсодержащими группировками —  $H_3O^+$  и  $H_2O$ . Все полиэдры могут заселяться различными подходящими по размеру катионами, чаще всего статистически как результат сложных механизмов изовалентного, гетеро-валентного и блочного изоморфизма [7].

Широкий изоморфизм элементов в большинстве внекаркасных и в части каркасных позиций в сочетании со структурным разнообразием приводит к большому числу самостоятельных минеральных видов, образующих группу, возглавляемую эвдиалитом. Сам родона-

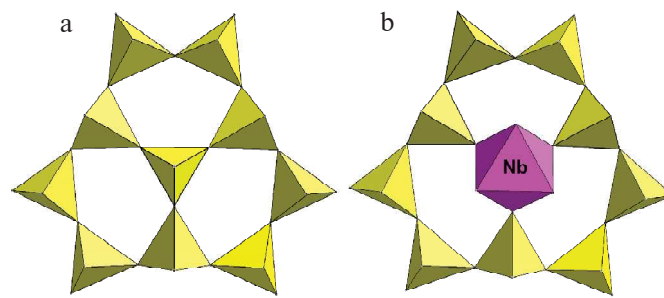


Рис. 3. 10-членные диски  $[Si_{10}O_{28}]$  (a) и  $[Si_9MO_{30}]$  (b)

Fig. 3. 10-membered discs  $[Si_{10}O_{28}]$  (a) and  $[Si_9MO_{30}]$  (b)

чальник группы имеет относительно простую идеализированную кристаллохимическую формулу  $Na_{15}Ca_6 \times Fe^{2+}_3Zr_3(Si_{26}O_{73})(O, OH, H_2O)_3(Cl, OH)_2$  ( $Z=3$ ), полученную в результате структурной расшифровки [2]. Другие же члены группы выделяются при доминировании каких-либо иных элементов в одной из ключевых позиций. Распределение этих элементов является результатом сочетания двух факторов — конкуренции их активностей в минералообразующей среде и сродства к различным позициям в структурах эвдиалитоподобных минералов, которые относятся к разным группам симметрии (*R3m*, *R-3m* или *R3*). Группа эвдиалита продолжает пополняться новыми минеральными видами. В частности, недавно Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации ММА были утверждены илюхинит [8, 10], сиудаит [11] и сергеванит (IMA 2019-057). И этот процесс продолжается, что выдвигает группу эвдиалита в разряд уникальных по числу потен-

циально возможных минеральных видов. В данной работе исследована структура нового образца эвдиалита (в широком смысле этого термина), найденного в агпаитовом пегматите на горе Кедыкверпахк (Ловозерский щелочной массив, Кольский полуостров).

#### Кристаллохимические особенности минерала Кдк-6626

При низком содержании кальция (меньше шести атомов на вышеприведенную формулу) его позиция обычно дополняется катионами марганца, железа и рядом других катионов, иногда приводя к разделению единой позиции на две позиции с разным размером октаэдров и понижением симметрии [5]. В данном случае при неоднозначности выбора симметрии уточнение проводилось в рамках пространственных групп *R3* и *R3m*. В





группе  $R3$  одна позиция с составом  $(Ca_{2.2}Fe_{0.8})$  имела параметр смещения  $0.98 \text{ \AA}$ , а вторая позиция с составом  $(Ca_{1.8}Mn_{1.2})$  имела параметр  $0.16 \text{ \AA}$  при одинаковых средних размерах октаэдров  $2.35$  и  $2.34 \text{ \AA}$  соответственно. В группе  $R3m$  эти параметры усреднились ( $0.61 \text{ \AA}$ ), что и послужило главным основанием выбора более высокой симметрии.

В основной ключевой микрообласти  $M2$  доминирует натрий, который центрирует крупный семивершинник в  $M2a$ -позиции. Na-полиэдр представляет собой вытянутую призму со средними расстояниями  $Na-O = 2.754 \text{ \AA}$ , одно основание которой — квадрат, а другое — треугольник из атома Cl и двух атомов O. В позиции  $M2b$  содержится избыток Zr ( $0.87$  атома), который разместился в пятивершиннике на основе квадрата, дополненного OH-группой, со средним расстоянием  $Zr-O = 2.204 \text{ \AA}$ . Эта OH-вершина принадлежит также октаэдру Nb на оси 3 с образованием кластера  $[(OH)NbZr_3]_{0.21}$ . Оба  $M2$ -полиэдра развернуты в противоположные стороны и заполняются статистически, т. к. расстояние между центрирующими их катионами короткое:  $1.781 \text{ \AA}$ .

Ключевые позиции на оси 3-го порядка статистически заняты преимущественно Si-центрированными тетраэдрами двух ориентаций с общим треугольным основанием и небольшой примесью атомов Ti и Nb в октаэдрической координации.

Позиции крупных катионов находятся в цеолитных полостях  $M1-M4$ ; каждая из них расщеплена на 2–3 подпозиции и занята преимущественно атомами натрия, формирующими 7- и 8-вершинники со средними расстояниями в пределах  $2.56-2.64 \text{ \AA}$ . Полость  $M5$  заполнена оксониевыми группами, гидроксильными группами и молекулами воды, распределенными статистически по нескольким подпозициям.

Все эти особенности распределения катионов в позициях структуры исследованного минерала отражены в его кристаллохимической формуле ( $Z = 3$ ):

$Zr_3[Ca_{3.9}Mn_{1.2}Fe_{0.9}][Na_{10.38}(H_3O, H_2O)_{2.79}Ce_{0.45}Sr_{0.4} \times K_{0.2}][Na^{VII}_{2.13}Zr_{0.87}] [Si_{24}O_{72}][Si_{1.48}Ti_{0.31}Nb_{0.21}](OH)_{2.9} \times (H_2O)_{1.26}(Cl, S)_{0.94}$ , где квадратными скобками выделены составы ключевых фрагментов структуры. Упрощенная формула имеет вид:



Сравнение изученного в настоящей работе минерала с близкими по составу и строению структурно исследованными низководными МГЭ приведено в таблице.

### Закключение

Собственно эвдиалит [2, 3] характеризуется в группе эвдиалита как высоконатриевый и высококремниевый минерал, у которого в  $M2$ -позиции находятся атомы  $Fe^{2+}$  в квадратной координации. В частности, образец 3458 [6] является собственно эвдиалитом. Высоконатриевые образцы 3248, 3043 и Кдк-6626 являются низкожелезистыми и в  $M2$ -позиции содержат в качестве доминирующего компонента натрия, чем и отличаются от эвдиалита. Однако образец 3248 содержит Mn в  $M3$ -позиции, а низкожелезистый и высококремниевый образец 3043 [9] отличается от эвдиалита ещё и симметрией (пр. гр.  $R-3m$ ). Эти существенные отличия трех близких по составу и строению минералов позволяют рассматривать образец Кдк-6626 как наиболее близкий из них к эвдиалиту и тем не менее отличающийся от него замещением Fe на Na в  $M2$ -позиции; следовательно, это потенциально новый минеральный вид.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (в части рентгеноструктурного анализа) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-12005 в части кристаллохимического анализа микропористых минералов группы эвдиалита и проект № 18-29-12007 в части ИК-спектроскопии и анализа химического состава).*

### Литература

1. Андрианов В. И. AREN-85 — система кристаллографических программ РЕНТГЕН на ЭВМ NORD, CM-4 и ЕС // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 1. С. 228.
2. Гольшев В. М., Симонов В. И., Белов Н. В. Кристаллическая структура эвдиалита // Кристаллография. 1972. Т. 17. № 6. С. 1119–1123.
3. Расцветаева П. К., Андрианов В. И. Новые данные о кристаллической структуре эвдиалита // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. № 5. С. 1122–1126.

Заселенность ключевых позиций в структуре собственно эвдиалита и его близких аналогов, Na-доминантных в позиции  $M2$

Population of key positions in the structure of eudialyte and its close analogues Na-dominant in  $M2$  position

Минерал Mineral	Пр. гр. Sp. gr.	Структурные позиции / Structural positions					Ссылки References
		$M1-M4$	$M1$	$M2$	$M3$	$M4$	
Эвдиалит Eudialyte	$R3m$	Na	Ca	$IVFe^{2+}$	Si	Si	[2, 3]
Эвдиалит 3458 Eudialyte 3458	$R3m$	Na	Ca	$IVFe^{2+}$	Si	Si	[6]
«Na-эвдиалит» 3248 «Na-eudialyte» 3248	$R3m$	Na	Ca	$VII Na$	Mn	Si	[4]
«Na-эвдиалит» 3043 «Na-eudialyte» 3043	$R-3m$	Na	Ca	$VII Na$	Si	Si	[9]
«Na-эвдиалит» Кдк-6626 «Na-eudialyte» Kdk-6626	$R3m$	Na	Ca	$VII Na$	Si	Si	[данная работа] [this paper]

Примечание: Римскими цифрами обозначены координационные числа полиэдров.

Note: Roman numerals denote coordination numbers of the polyhedra.



4. Расцветаева Р. К., Хомяков А. П. Кристаллическая структура низкожелезистого аналога эвдиалита // ДАН. 1998. Т. 362. № 6. С. 784—788.
5. Расцветаева Р. К. Структурная минералогия группы эвдиалита // Кристаллография. 2007. Т. 52. № 1. С. 50—67.
6. Расцветаева Р. К., Розенберг К. А., Хомяков А. П. Упорядочение катионов в структуре высококремнистых эвдиалитов // Порядок, беспорядок и свойства оксидов: Сб. тр. 11-го Международного симпозиума (ODPO). 2008. Часть II. С. 73—76.
7. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород, 2012. 230 с.
8. Расцветаева Р. К., Розенберг К. А., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Кристаллическая структура илюхинита — нового минерала группы эвдиалита // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 1. С. 69—74.
9. Розенберг К. А., Расцветаева Р. К., Верин И. А. Кристаллическая структура центросимметричного 12-слойного высоконатриевого эвдиалита // Кристаллография. 2009. Т. 54. № 3. С. 446—450.
10. Чуканов Н. В., Расцветаева Р. К., Розенберг К. А., Аксенов С. М. и др. Илюхинит  $(\text{H}_3\text{O}, \text{Na})_{14}\text{Ca}_6\text{Mn}_2\text{Zr}_3 \times \text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  — новый минерал группы эвдиалита // Записки РМО. 2016. Т. 145(2). С. 44—57.
11. Chukanov N. V., Rastsvetaeva R. K., Kruszewski Lukasz, Aksenov S. M. et al. Siudaite,  $\text{Na}_8(\text{Mn}^{2+}_2\text{Na}) \times \text{Ca}_6\text{Fe}^{3+}_3\text{Zr}_3\text{NbSi}_{25}\text{O}_{74}(\text{OH})_2\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , a new eudialyte-group mineral from the Khibiny alkaline massif, Kola Peninsula. *Phys. Chem. Min.* 2018. V. 45. № 8. P. 745—758.
12. Sjöqvist Axel S. L. The Tale of Greenlandite: Commemorating the Two-Hundredth Anniversary of Eudialyte (1819—2019) // *Minerals*. 2019. V. 9(8). P. 497—510.
13. Stromeyer, F. Analyse einiger von dem Prof. von Giesecke in Grönland entdeckten Fossilien: Gieseckit, Saphirin, Apophyllit, Dichroit, Arragonit und Eudialit. *Annalen der Physik und der physikalischen Chemie* 1819. V. 63(3). P. 372—381 [in German].
1. Andrianov V. I. *AREN-85 — sistema kristallograficheskikh programm RENTGEN na EVM NORD, SM-4 i EC* (AREN-85 — system of crystallographical programs RENTGEN for EVM NORD, SM-4 and EC). *Crystallography Reports*, 1987, V. 32, No. 1, pp. 228—232.
2. Golishev V. M., Simonov V. I., Belov N. V. *Kristallicheskaya struktura evdialita* (Crystal structure of eudialyte). *Crystallography Reports*, 1972, V. 17, No. 6, pp. 1119—1123.
3. Rastsvetaeva R. K., Andrianov V. I. *Novye dannye o kristallicheskoi strukture evdialita* (New data on crystal structure of eudialyte). *Doklady AS SSSR*, 1987, V. 293, No. 5, pp. 1122—1126.
4. Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P. *Kristallicheskaya struktura nizkozhlezistogo analoga evdialita* (Crystal structure of eudialyte low ferrum analog). *Doklady AS*, 1998, V. 362, No. 6, pp. 784—788.
5. Rastsvetaeva R. K. *Strukturnaya mineralogiya gruppy evdialita* (Structure mineralogy of eudialyte group). *Crystallography Reports*, 2007, V. 52, No. 1, pp. 50—67.
6. Rastsvetaeva R. K., Rozenberg K. A., Khomyakov A. P. *Uporyadochenie kationov v strukture vysokokremnistyh evdialitov* (Cationic ordering in the structure of high silicon eudialytes). *Oder, Disorder and Properties of Oxides: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International conference (ODPO)*, 2008, Part II, pp. 73—76.
7. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Aksenov S. M. *Mineraly gruppy evdialita: kristallohimiya, svoistva, genezis* (Minerals of eudialyte group: crystalchemistry, properties, genesis). *Nizhniy Novgorod*, 2012, 230 pp.
8. Rastsvetaeva R. K., Rozenberg K. A., Chukanov N. V., Aksenov S. M. *Kristallicheskaya struktura ilyuhinita — novogo minerala gruppy evdialita* (Crystal structure of ilyukhinite, a new mineral of the eudialyte group). *Crystallography Reports*, 2017, V. 62, No. 1, pp. 60—65.
9. Rozenberg K. A., Rastsvetaeva R. K., Verin I. A. *Kristallicheskaya struktura tsentrosimmetrichnogo 12-sloinogo vysokonatrievogo evdialita* (Crystal structure of centrosymmetrical 12-layer high sodium eudialyte). *Crystallography Reports*, 2009, V. 54, No. 3, pp. 446—450.
10. Chukanov N. V., Rastsvetaeva R. K., Rozenberg K. A., Aksenov S. M. et al. *Ilyuhinit  $(\text{H}_3\text{O}, \text{Na})_{14}\text{Ca}_6\text{Mn}_2 \times \text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  — novyi mineral gruppy evdialita* (Ilyukhinite,  $(\text{H}_3\text{O}, \text{Na})_{14}\text{Ca}_6\text{Mn}_2\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , a new mineral of the eudialyte group). *Geology of Ore Deposits*, 2017, V. 59, No. 7, pp. 592—600.
11. Chukanov N. V., Rastsvetaeva R. K., Kruszewski Lukasz, Aksenov S. M. et al. Siudaite,  $\text{Na}_8(\text{Mn}^{2+}_2\text{Na})\text{Ca}_6 \times \text{Fe}^{3+}_3\text{Zr}_3\text{NbSi}_{25}\text{O}_{74}(\text{OH})_2\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , a new eudialyte-group mineral from the Khibiny alkaline massif, Kola Peninsula. *Phys. Chem. Min.*, 2018, V. 45, No. 8, pp. 745—758.
12. Sjöqvist A. S. L. The Tale of Greenlandite: Commemorating the Two-Hundredth Anniversary of Eudialyte (1819—2019). *Minerals*, 2019, V. 9(8), P. 497—510, DOI: 10.3390/min9080497.
13. Stromeyer, F. Analyse einiger von dem Prof. von Giesecke in Grönland entdeckten Fossilien: Gieseckit, Saphirin, Apophyllit, Dichroit, Arragonit und Eudialit. *Annalen der Physik und der physikalischen Chemie* 1819, V. 63(3), pp. 372—381.

Поступила в редакцию / Received 12.12.19