

Упорядочение катионов в минералах сложного состава: P3-сергеванит — второй представитель группы эвдиалита с примитивной ячейкой

Р. К. Расцветаева

Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва
rast@crys.ras.ru

На основе полученных ранее дифракционных данных выполнено повторное уточнение кристаллической структуры минерала сергеванита с идеализированной формулой $(\text{Na}_{12}\text{KH}_3\text{O})[\text{Ca}_3(\text{Mn}_2\text{Ca})](\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_{25.5}\text{O}_{72}\text{OH}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ — низкокальциевого минерала группы эвдиалита из Ловозерского щелочного комплекса. Параметры элементарной ячейки: $a = 14.2179(1)$, $c = 30.3492(3)$ Å, $V = 5313.1(1)$ Å³. Кристаллическая структура из 174 позиций уточнена в рамках тригональной пространственной группы P3 до итогового фактора расходимости $R = 4.7$ % с использованием 5613 усредненных независимых рефлексов с $F > 3\sigma(F)$. Установлено более детальное, приближенное к реальному распределение катионов по позициям. Изученный в настоящей работе сергеванит является вторым минералом группы эвдиалита, в котором установлено понижение симметрии от ромбоэдрической (R3) до тригональной (P3).

Ключевые слова: сергеванит, группа эвдиалита, кристаллическая структура, изоморфизм, ключевые позиции, примитивная ячейка.

Cations ordering in minerals with complex composition: P3-sergevanite — the second representative of eudialyte group with primitive cell

R. K. Rastsvetaeva

Shubnikov Institute of Crystallography FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Moscow

Sergevanite with idealized formula $(\text{Na}_{12}\text{KH}_3\text{O})[\text{Ca}_3(\text{Mn}_2\text{Ca})](\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Ti}_{0.5}\text{Si}_{25.5}\text{O}_{72}\text{OH}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ ($Z = 3$) — a low calcium eudialyte group mineral from Lovozero alkaline complex was investigated repeatedly using obtained earlier the X-ray diffraction data. Its crystal structure with 174 sites was refined in the frame of trigonal primitive cell to $R = 4.7$ % on the base of 5613 averaged independent reflections with $F > 3\sigma(F)$. The unit-cell parameters were: $a = 14.2179(1)$, $c = 30.3492(3)$ Å, $V = 5313.1(1)$ Å³, space group P3. More detailed, close to real, cations distribution on sites was established. Studied sergevanite was the second mineral of eudialyte group with lowering symmetry from rhombohedral (R3) to trigonal (P3).

Keywords: sergevanite, eudialyte group, crystal structure, isomorphism, key sites, primitive cell.

Введение

Со времени открытия цирконосиликата эвдиалита 200 лет назад (Sjöqvist, 2019) он не перестает быть объектом интенсивных исследований, что обусловлено его уникальным кристаллохимическим многообразием. Эвдиалит образует группу минералов, которая регулярно пополняется и в настоящее время насчитывает 31 минеральный вид. Только за последние годы были открыты пять новых минералов — илюхинит (Расцветаева и др., 2017), сиудаит (Chukanov et al., 2018), сергеванит (Chukanov et al., 2020), одихинчаит (Gritsenko et al., 2020) и селсуртит (Chukanov et al., 2023). Кроме того, недавно была сделана попытка синтезировать эвдиалит в лабораторных условиях (Kovalskaya et al., 2023).

Минералы группы эвдиалита — не только одни из самых сложных по составу, поскольку в них могут присутствовать более 25 элементов таблицы Менделеева (от легкого водорода до тяжелого тантала), но и уникальны по сложности структуры. Структуры этих три-

гональных минералов содержат кольцевые фрагменты — тетраэдрические кольца Si_3O_9 и Si_9O_{27} , плоские диски $\text{Si}_{10}\text{O}_{28}$ и $\text{Si}_{10}\text{O}_{27}(\text{OH})$, кольца реберно-связанных октаэдров Ca_6O_{24} , $\text{Ca}_3\text{Mn}_3\text{O}_{24}$ и $\text{Na}_3\text{Mn}_3\text{O}_{24}$, которые обусловлены осями третьего порядка с координатами $[0\ 0\ z]$, $[2/3\ 1/3\ z]$ и $[1/3\ 2/3\ z]$. За счет R-трансляции эти оси взаимозависимы, и катион-анионный состав вокруг оси $[0\ 0\ z]$ повторяется трижды со сдвигом вдоль $(z+0.33)$ и $(z+0.66)$ соответственно.

Широкие вариации химического состава, а также различные особенности распределения катионов по структурным позициям и способы их упорядочения обуславливают большое разнообразие минеральных видов, разновидностей и твердых растворов данной группы, в том числе отличающихся по симметрии (Расцветаева и др., 2012; Johnsen et al., 1999; Rastsvetaeva, Chukanov, 2020; Rastsvetaeva et al., 2020). Симметрия эвдиалита зависит и от условий кристаллизации. Минералы, формирующиеся на ранней стадии кристаллизации при высоких температурах, характеризу-

Для цитирования: Расцветаева Р. К. Упорядочение катионов в минералах сложного состава: P3-сергеванит — второй представитель группы эвдиалита с примитивной ячейкой // Вестник геонаук. 2023. 8(344). С. 26–30. DOI: 10.19110/geov.2023.8.3

For citation: Rastsvetaeva R. K. Cations ordering in minerals with complex composition: P3-sergevanite — the second representative of eudialyte group with primitive cell. Vestnik of Geosciences, 2023, 8(344), pp. 26–30, doi: 10.19110/geov.2023.8.3



ются центросимметричной пространственной группой (далее — пр. гр.) $R\bar{3}m$. С понижением температуры в условиях более медленной кристаллизации состав в эвдиалитах упорядочивается в рамках ацентричной пр. гр. $R3m$. Если присутствуют оба фактора (специфический состав и низкая температура), возможно упорядочение с дальнейшим понижением симметрии и переходом в осевую пр. гр. $R3$.

Первые структурные расшифровки минералов группы эвдиалита были выполнены в рамках центросимметричной пр. гр. (Гольшев и др., 1972, Giuseppetti et al., 1971) с локализацией и уточнением 37 позиций (27 в каркасе и 10 внекаркасных), что оправдано экспериментальными методами того периода времени. С усовершенствованием техники эксперимента и программного обеспечения появилась возможность получать более детальную информацию о распределении элементов в структурах эвдиалитовых минералов (аналогично другим минералам с цеолитоподобными микропористыми гетерополиэдрическими структурами) с большим числом внекаркасных позиций при их расщеплении и частичной заселенности. Поэтому большинство эвдиалитовых структур характеризуются пр. гр. $R3m$, а центросимметричная группа используется в основном при описании эвдиалитов с удвоенным c -параметром ячейки (Расцветаева и др., 2012). Более низкосимметричная пр. гр. $R3$ характерна для гидратированных представителей (аквалит и другие) и главным образом для низкокальциевых эвдиалитов с упорядоченным распределением катионов в октаэдрах шестичленного кольца при замещении Ca на Mn, Fe и ряд других элементов (структурные типы онейллита и раслакита и промежуточные члены их твердых растворов).

Детали строения с уточненным составом расщепленных позиций очень важны и могут быть полезны для решения кристаллохимических, генетических, петрографических и технологических задач. В этом отношении показательным может быть недавнее исследование ряда гидратированных эвдиалитов (включая аквалит $(H_3O)_8(Na,K,Sr)_5Ca_6Zr_3Si_{26}O_{66}(OH)_9Cl$), с применением рамановских спектров, которые оказались значительно более чувствительными к присутствию гидратированных форм, чем ИК-спектры (Chukanov et al., 2022). Использование этого метода стало возможным благодаря тому, что в структурах эвдиалитов в результате их гидролитического преобразования присутствуют расщепленные позиции, статистически заполненные оксонием, молекулами воды и гидроксильными группами.

Хотя десятки структурно изученных минералов группы эвдиалита описаны в рамках R -решетки (Расцветаева и др., 2012; Johnsen et al., 1999), возможно и дальнейшее понижение симметрии их структуры с нарушением R -трансляции. При этом в пространственной группе $P3$ из всех элементов симметрии сохраняется только ось третьего порядка (не считая, конечно, трансляций вдоль параметров ячейки). Как следствие, три оси — $[00z]$, $[1/3\ 2/3\ z]$ и $[2/3\ 1/3\ z]$ — становятся независимыми и вся структура распадается на три фрагмента, а связывающие их трансляции $[1/3\ 2/3\ 2/3]$ и $[2/3\ 1/3\ 1/3]$ становятся псевдотрансляциями. Конечно, переход в примитивную ячейку, связанный с трехкратным увеличением числа независимых позиций, требует и соответствующего увеличения коли-

чества экспериментальных отражений, среди которых должны присутствовать отражения, не отвечающие законам погасания R -решетки. Такие рефлексы нередко фиксировались в эвдиалитовых экспериментах и ранее, но они были малочисленны и относительно слабы. Кроме того, работа со структурой, содержащей более 150 независимых позиций, сопряжена с дополнительными трудностями, что не стимулировало исследователей.

Впервые переход в примитивную ячейку был выполнен нами при исследовании низкокальциевого и высокоциркониевого образца эвдиалита $Na_{15}Ca_3(Mn,Fe)_3Zr_3[Na_2Zr][Si_{26}O_{72}](OH)_3Cl \cdot H_2O$ ($Z = 3$), найденного в ультраапатитовом пегматите на горе Аллуайв (Ловозерский щелочной комплекс) и принадлежащего системе твердых растворов сергеванит – раслакит – онейллит [Расцветаева, Чуканов, 2021]. В $P3$ -структуре этого минерала было локализовано и уточнено до $R = 4.9\%$ в изотропно-анизотропном приближении атомных смещений 165 позиций с использованием 5620 независимых рефлексов с $F > 3\sigma(F)$.

В настоящей статье приведены результаты исследования сергеванита — второго представителя группы эвдиалита с симметрией $P3$.

Объект, методы и результаты исследования

Сергеванит найден Н. В. Чукановым на горе Карнасурт Ловозерского щелочного массива (Кольский полуостров). Его химический состав определен методом локального рентгеноспектрального микроанализа и соответствует эмпирической формуле, рассчитанной на 25.5 атомов кремния (число формульных единиц $Z = 3$): $H_{14.46}Na_{13.64}K_{0.92}Ca_{4.22}Ce_{0.27}La_{0.17}Nd_{0.12}Pr_{0.06}Sm_{0.02}Mn_{1.81}Fe^{2+}_{0.58}Ti_{0.46}Zr_{2.67}Hf_{0.04}Nb_{0.38}Si_{25.50}S_{0.30}Cl_{0.20}O_{81.35}$ (Chukanov et al., 2020).

Экспериментальный набор дифракционных данных получен в полной сфере обратного пространства с использованием монокристалльного дифрактометра Xcalibur Oxford Diffraction (MoK α -излучение), оснащенного CCD-детектором, а измеренные параметры элементарной ячейки составили: $a = 14.2179(1)$, $c = 30.3492(3)$ Å, $V = 5313.1(7)$ Å³. Первоначальное рентгеноструктурное исследование минерала было выполнено на образце № 8210 в рамках пространственной группы $R3$ с использованием ограниченного числа независимых отражений ($2688\ I > 7\sigma(I)$) (Расцветаева и др., 2010). На основе этого же эксперимента в более полном объеме ($5235\ I > 3\sigma(I)$) структура минерала была исследована повторно и минерал был утвержден в качестве нового минерального вида $[Na_{12}K(H_3O)_2]Ca_3(Mn_2Ca)(Na_2Fe)Zr_3Ti_{0.5}Si_{25.5}O_{72}(OH)_3 \cdot H_2O$ под названием «сергеванит» (Chukanov et al., 2020). Однако структура, полученная и описанная в этой работе, является лишь обобщенной моделью, содержащей нерасщепленные позиции со смешанным составом. Это послужило стимулом для дальнейшего поиска и уточнения кристаллической структуры сергеванита (Rastsvetaeva, 2022) с использованием тех же экспериментальных данных и в рамках той же симметрии. В результате число локализованных и уточненных позиций составило 80 и увеличилось на 20 внутрикаркасных позиций, что позволило установить ряд дополнительных кристаллохимических особенностей этого минерала.

При этом по-прежнему часть расщепленных позиций оставалась смешанно-заселенной.

Вместе с тем опыт понижения симметрии с переходом к пр. гр. $P3$ в исследованной ранее разновидности сергеванита (Расцветаева, Чуканов, 2021) из того же Ловозерского комплекса давал основание считать, что и сергеванит может обладать такой же симметрией, тем более что в том же массиве дифракционных данных из 80 000 отражений 1.25 % рефлексов нарушали R -симметрию. Это предположение послужило основанием для нового исследования сергеванита с использованием этих дифракционных данных, но с включением в них рефлексов, не отвечающих R -центрированной ячейке. Модель структуры в рамках пр. гр. $P3$ с использованием усредненных $5613 F > 3\sigma(F)$ была получена с помощью процедуры коррекции фаз, разработанной в рамках программы AREN (Андрианов, 1987). В качестве исходного фрагмента использованы 35 координат атомов каркаса $R3$ -сергеванита (Rastsvetaeva, 2022). Внекаркасные позиции найдены из серии разностных синтезов электронной плотности. В результате получены 170 позиций, отвечающих модели $P3$ -структуры сергеванита с R -фактором 32 %. Распределение элементов по позициям в соответствии с данными химического состава и дальнейшее уточнение структуры в изотропно-анизотропном приближении атомных смещений снизило R -фактор до 4.7 %. Все расчеты выполнены с использованием системы кристаллографических программ AREN (Андрианов, 1987). Уточненные структурные параметры в некоторых ключевых позициях каркаса и характеристики координационных полиэдров в них приведены в таблицах 1 и 2.

Обсуждение результатов

Распределение катионов по позициям P -структуры сергеванита в целом соответствует найденному в рамках R -структуры (Rastsvetaeva, 2022), но понижение симметрии выявило некоторые детали, позволяющие

получить информацию о структуре сергеванита, приближенную к реальной, и проследить особенности распределения состава в позициях обоих $P3$ -эвдиалитов (рис. 1).

Распределение Hf в Z -октаэдрах структуры показывает, что этот тяжелый элемент является примесью только в одном из трех независимых октаэдров циркония (рис. 1), а значит, как и в предыдущем случае (Расцветаева, Чуканов, 2021), его распределение является одной из причин нарушения R -центрированности ячейки. Атомы Nb располагаются вместе с Zr в $Zr3$ -позиции с меньшим по размеру полиэдром (среднее $Zr3-O = 2.06 \text{ \AA}$), чем октаэдр, занятый целиком цирконием (среднее $Zr2-O = 2.11 \text{ \AA}$).

В позиции октаэдра шестичленного кольца сергеванита содержится $2/3$ атомов Ca и $1/3$ Mn. При этом атомы Ca и Mn в рамках R -ячейки распределены либо в одной позиции смешанного состава (пр. гр. $R3m$ или $R-3m$), либо по двум независимым позициям в октаэдрах, которые чередуются друг с другом (пр. гр. $R3$). С переходом в P -ячейку каждая из этих двух позиций утраивается, при этом атомы Mn распределены по трем октаэдрам в позициях $M1.1-M1.3$ не равномерно, а дифференцированно с нарушением R -центрировки: один октаэдр они занимают целиком, второй совместно с кальцием, а в третьем Ca доминирует (рис. 1). Можно отметить также, что в октаэдре со смешанной заселенностью расщепление позиции $M1.1$, впервые установленное нами в $R3$ -сергеваните (Rastsvetaeva, 2022), сохраняется и в его P -ячейке ($M1.1a-M1.1b = 0.47(1) \text{ \AA}$).

Третья важная ключевая микрообласть $M2$ находится между двумя ребрами октаэдров $M1O_6$, принадлежащих соседним шестичленным кольцам, и занята атомами Fe и Na при доминировании последнего. Атомы Na находятся в позициях «квадрата», дополненного OH-группой до пятивершинников со средними расстояниями в них $Na-O = 2.20$ и 2.48 \AA соответственно (табл. 2). Атомы железа с примесью натрия достраивают свой квадрат двумя OH-группами до окта-

Таблица 1. Координаты, параметры изотропных атомных смещений ($B_{\text{изо}}$, \AA^2), заселенность (q) и кратность позиций Q в главных ключевых позициях структуры $P3$ -сергеванита

Table 1. Atom coordinates, isotropic atomic displacement parameters (B_{iso} , \AA^2), site occupancies (q) and site multiplicities (Q) in the main key-sites of the $P3$ -sergevanite crystal structure

Позиция Site	x	y	z	$B_{\text{экв}}$ B_{eq}	q	Q
Zr1	-0.0034(1)	0.5014(1)	0.4999(1)	0.65(2)	1	3
Zr2	0.1610(1)	0.3406(1)	0.8335(1)	0.99(2)	1	3
Zr3	0.3470(1)	0.1695(1)	0.1655(1)	1.21(3)	1	3
$M1.1a$	0.2431(1)	0.2435(1)	0.0000(1)	0.63(3)	0.8	3
$M1.1b$	0.2758(18)	0.2763(19)	0.0000(6)	2.72(7)	0.2	3
$M1.2$	0.3991(1)	0.3340(1)	0.3328(1)	0.69(3)	1	3
$M1.3$	0.3343(2)	0.4124(2)	0.6668(1)	0.76(5)	1	3
$M1.4$	0.0013(2)	0.2599(2)	0.0001(1)	0.98(4)	1	3
$M1.5$	0.6662(1)	0.6052(1)	0.3330(1)	0.67(2)	1	3
$M1.6$	0.5728(2)	0.6667(2)	0.6734(1)	0.45(4)	1	3
$M2.1$	0.9622(3)	0.4812(3)	-0.0033(1)	1.89(9)	1	3
$M2.2$	0.1617(4)	0.3204(4)	0.3333(2)	1.43(6)	1	3
$M2.3$	0.4307(17)	0.2175(14)	0.6695(4)	1.95(18)	1	3



Таблица 2. Состав катионов ($Z = 1$) в главных ключевых позициях и характеристики их координационных полиэдров

Table 2. Cationic composition ($Z = 1$) in the main key sites and characteristics of their coordination polyhedra

Позиция Site	Состав Composition	КЧ CN	Расстояния катион – анион (Å) Cation – anion distances (Å)		
			Минимальное Minimal	Максимальное Maximal	Среднее Mean
Zr1	Zr _{2.96} Hf _{0.04}	6	1.96(1)	2.09(1)	2.05
Zr2	Zr ₃	6	1.96(1)	2.30(1)	2.11
Zr3	Zr _{2.6} Nb _{0.4}	6	1.90(1)	2.26(1)	2.06
M1.1a	Mn _{1.8} Ca _{0.6}	6	2.32(1)	2.51(7)	2.43
M1.1b	Ca _{0.6}	6	2.13(2)	2.62(3)	2.38
M1.2	Mn ₃	6	2.09(2)	2.43(1)	2.31
M1.3	Ca ₃	6	2.28(1)	2.49(1)	2.42
M1.4	Ca ₃	6	2.07(1)	2.47(1)	2.26
M1.5	Ca _{2.7} Ce _{0.3}	6	2.21(2)	2.46(1)	2.32
M1.6	Ca _{2.7} Ce _{0.3}	6	2.28(5)	2.49(7)	2.42
M2.1	Na ₃	5	2.09(1)	2.36(2)	2.20
M2.2	Fe _{2.1} Na _{0.9}	6	1.80(6)	2.41(1)	2.15
M2.3	Na ₃	5	2.20(2)	2.71(3)	2.48

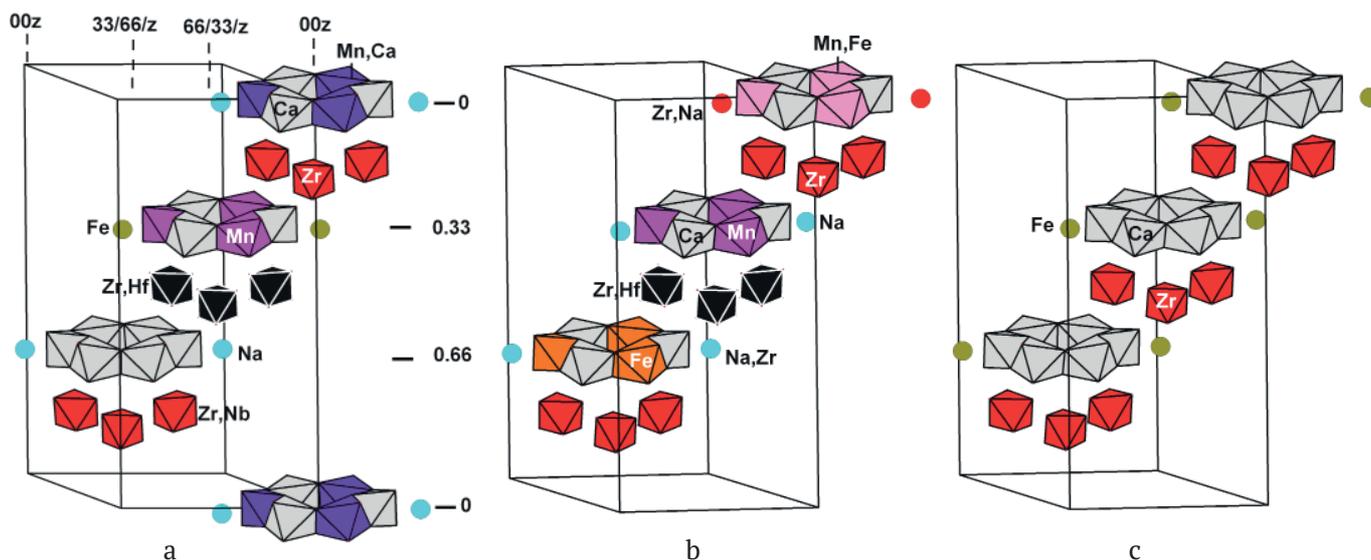


Рис. 1. Распределение катионов по ключевым Zr-, M1- и M2-позициям вокруг трех кристаллографически независимых осей третьего порядка в структурах P3-сергеванита (а), высокоциркониевой разновидности сергеванита (Расцветваева, Чуканов, 2021) (b) и гипотетического P3-эвдиалита с максимальным количеством Ca и Fe (с)

Fig. 1. Distribution of cations in the key-sites Zr-, M1- and M2 around three crystallographical independent axes 3 in the P3-sergevanite structure (a), Zr-rich sergevanite variety structure (Rastsvetaeva, Chukanov, 2021) (b) and hypothetical P3-eudialyte with maximal content of Ca and Fe (c)

эдра со средним расстоянием $M2.2-O = 2.15 \text{ \AA}$. Оба Na-полиэдра разместились вокруг двух осей третьего порядка на высоте $z = 0$ и 0.66 , в то время как Fe-доминантный октаэдр находится между ними на высоте $z = 0.33$ (рис. 1).

Выводы

Настоящее исследование сергеванита показало, что структурная модель этого минерала адекватно описывается как в рамках пр. гр. $R3$ (с разной степенью детализации), так и пр. гр. $P3$, и распределение катионов по позициям P -структуры в целом соответствует найденному в рамках R -структуры. Однако иссле-

дование с понижением симметрии позволило установить ряд новых закономерностей катионного упорядочения не только во внутрикаркасных, но и в каркасных позициях сергеванита.

Сергеванит является вторым примером минералов группы эвдиалита, в котором методом монокристалльного рентгеноструктурного анализа установлено понижение симметрии от ромбоэдрической до тригональной с переходом в примитивную P -ячейку. Можно предположить, что оба минерала из ловозерского щелочного комплекса (сергеванит и его высокоциркониевая разновидность) имеют позднепегматитовое происхождение и формировались в специфических условиях медленной кристаллизации при низких тем-

пературах и уменьшении скорости процесса кристаллизации на последних стадиях остывания остаточно-го расплава.

Факт нарушения *R*-центрировки, зафиксированный в двух исследованных минералах группы эвдиалита, указывает на то, что, возможно, реальная структура и в некоторых других эвдиалитах не ромбоэдрическая, а тригональная с примитивной решеткой. А причиной понижения симметрии в них является в первую очередь упорядочение относительно тяжелых элементов, в то время как вклад в понижение симметрии более легких внутрикаркасных атомов несущественен.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Литература / References

- Андреанов В. И. AREN-85 — система кристаллографических программ РЕНТГЕН на ЭВМ NORD, SM-4 и EC // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 1. С. 228–232.
- Andrianov V. I. AREN-85 — system of crystallographical programs RENTGEN for EVM NORD, SM-4 and EC. Crystallography Reports, 1987, V. 32, No. 1, pp. 228–232. (in Russian)
- Гольшев В. М., Симонов В. И., Белов Н. В. Кристаллическая структура эвдиалита // Кристаллография. 1972. Т. 17. № 6. С. 1119–1123.
- Golishev V. M., Simonov V. I., Belov N. V. Crystal structure of eudialyte. Crystallography Reports, 1972, V. 17, No. 6, pp. 1119–1123. (in Russian)
- Расцветова П. К., Аксенов С. М., Чуканов Н. В. Кристаллическая структура Mn-аналога раслакита — нового представителя группы эвдиалита // Доклады АН. 2010. Т. 431. № 2. С. 201–206.
- Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Chukanov N. V. Crystal structure of raslakite analogue — a new representative of eudialyte group. Doklady Earth Sciences, 2010, V. 431, No. 2, pp. 201–206. (in Russian)
- Расцветова П. 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.
- Rastsvetaeva R. K., Rozenberg K. A., Chukanov N. V., Aksenov S. M. Crystal structure of ilyukhinite, a new mineral of the eudialyte group. Crystallography Reports, 2017, V. 62, No. 1, pp. 60–65. DOI: 10.1134/S1063774517010199. (in Russian)
- Расцветова П. К., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород: Изд-во НГУ. 2012. 230 с.
- Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Aksenov S. M. Eudialyte-Group Minerals: Crystal Chemistry, Properties, and Genesis. Editorial House of the Nizhny Novgorod State Univ., Nizhny Novgorod, 2012, 230 pp. (in Russian)
- Расцветова П. К., Чуканов Н. В. Кристаллическая структура первого представителя группы эвдиалита с примитивной ячейкой // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 6. С. 884–893. DOI: 10.31857/S0023476121060308.
- Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V. Crystal structure of the first representative of eudialyte group with primitive cell. Kristallografiya, 2021, V. 66, No. 6, pp. 884–893. DOI: 10.31857/S0023476121060308. (in Russian)
- Chukanov N. V., Rastsvetaeva R. K., Kruszewski L., Aksenov S. M., Rusakov V. S., Britvin S. N., Vozchikova S. A. Siudaite, $\text{Na}_8(\text{Mn}^{2+}_2\text{Na})\text{Ca}_6\text{Fe}^{3+}_3\text{Zr}_3\text{NbSi}_{25}\text{O}_{74}(\text{OH})_2\text{Cl}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Khibiny alkaline massif, Kola Peninsula // Physics and Chemistry of Minerals. 2018. V. 45. No. 8. pp. 745–758. DOI: 10.1007/s00269-018-0959-9.
- Chukanov N. V., Aksenov S. M., Pekov I. V., Belakovskiy D. I., Vozchikova S. A., Britvin S. N. Sergevanite, $\text{Na}_{15}(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_3\cdot\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // Canadian Mineralogist. 2020. V. 58. pp. 421–436. DOI: 10.3749/canmin.2000006.
- Chukanov N. V., Aksenov S. M., Kazheva O. N., Pekov I. V., Varlamov D. A., Vigasina M. F., Belakovskiy D. I., Vozchikova S. A., Britvin S. N. Selsurtite, $(\text{H}_3\text{O})_{12}\text{Na}_3(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}_{24}\text{O}_{69}(\text{OH})_3(\text{OH})\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // Mineralogical Magazine. 2023. V. 87, pp. 241–251. DOI: 10.1180/mgm.2022.136.
- Chukanov N. V., Vigasina M. F., Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Mikhailova J. A., Pekov I. V. The evidence of hydrated proton in eudialyte-group minerals based on Raman spectroscopy data // J. Raman Spectrosc. 2022. V. 53. pp. 1188–1203. DOI: 10.1002/jrs.6543.
- Giuseppetti G., Mazzi F., Tadini C. The crystal structure of eudialyte. Tshermaks Mineral. Petrogr. Mitt. 1971. V. 16, pp. 105–127.
- Gritsenko Y. D., Chukanov N. V., Aksenov S. M., Pekov I. V., Varlamov D. A., Pautov L. A., Vozchikova S. A., Ksenofontov D. A., Britvin S. N. Odikhinchaite, $\text{Na}_9\text{Sr}_3[(\text{H}_2\text{O})_2\text{Na}]\text{Ca}_6\text{Mn}_3\text{Zr}_3\text{NbSi}(\text{Si}_{24}\text{O}_{72})\text{O}(\text{OH})_3(\text{CO}_3)\cdot\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Odikhincha intrusion, Taimyr Peninsula, Russia // Minerals. 2020. V. 10. Paper 1062. DOI: 10.3390/min10121062.
- Johnsen, O.; Grice, J. D.; Gault, R. A. The crystal chemistry of the eudialyte group. Canad. Mineral. 1999, V. 37(4), pp. 865–891.
- Kovalskaya T. N., Ermolaeva V. N., Chukanov N. V. et al. Synthesis of Fe-deficient eudialyte analogues: Relationships between the composition of the reaction system and crystal-chemical features of the products // Mineralogical Magazine. 2023. V.87, pp.233–240. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.1>.
- Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V. New data on the isomorphism in eudialyte-group minerals. 2. Crystal-chemical mechanisms of blocky isomorphism at the key sites (a review) // Minerals 2020, 10(8), 720. P. 87–102. doi.org/10.3390/min10080720.
- Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Pekov I. V., Schäfer Ch., Van K. V. New data on the isomorphism in eudialyte-group minerals. 1. Crystal chemistry of eudialyte-group members with Na incorporated into the framework as a marker of hyperagpaitic conditions // Minerals. 2020. V. 10(7), 587. 16 pp. DOI: 10.3390/min10070587.
- Rastsvetaeva R. K. New Data on the Structure of Eudialyte-Group Mineral Sergevanite. Ordered and Disordered Structures of Minerals with Complex Composition. Crystallography Reports, 2022, V. 67, No. 7, pp. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1063774522070471.
- Sjöqvist A. S. L. The Tale of Greenlandite: Commemorating the Two-Hundredth Anniversary of Eudialyte (1819–2019). Minerals, 2019, V. 9(8), pp. 497–510, DOI:10.3390/min9080497.