



Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. VI. Особенности P3-модели аналога высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко)

Р. К. Расцветаева¹, В. М. Гридчина¹, Н. В. Чуканов², С. М. Аксенов^{3,4}

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, rast.crys@gmail.com

² ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

³ Лаборатория арктической минералогии и материаловедения,
ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

⁴ Геологический институт ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

Методом монокристалльного рентгеноструктурного анализа изучена кристаллическая структура представителя группы эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) с химическим составом следующей стехиометрии (по данным электронно-зондовых анализов и хроматографического анализа CO₂ в расчете на 26 атомов Si + Nb, Z = 3): Na_{8.1}K_{0.45}Ln_{0.6}Ca_{7.2}Mn_{2.2}Fe_{1.5}Zr_{3.1}Nb_{0.8–0.9}Si_{25.1–25.2}Cl_{0.3}(CO₃)_{0.4}. Минерал является фрагментом монокристалла изученного ранее потенциально нового высококальциевого минерала группы эвдиалита со сложной ростовой зональностью, отличаясь от него повышенным содержанием кальция, натрия и ниобия. Параметры элементарной ячейки: $a = 14.1530(1)$, $c = 30.0801(2)$ Å, $V = 5218.1(5)$ Å³, пр. гр. P3. Модель кристаллической структуры минерала, содержащая 163 позиции, уточнена до итогового фактора расходимости $R = 5.48$ % с использованием 4 644 независимых отражений с $F > 3\sigma(F)$. Переход от «классической» ромбоэдрической R-решетки в примитивную позволил установить детали упорядочения внекаркасных катионов, понижающих симметрию.

Ключевые слова: группа эвдиалита, кристаллическая структура, ключевые позиции, примитивная элементарная ячейка, массив Тамазерт (Марокко)

Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. VI. Features of P3-model structure of the high calcium eudialyte analogue from the Tamazert massif (Morocco)

R. K. Rastsvetaeva¹, V. M. Gridchina¹, N. V. Chukanov², S. M. Aksenov^{3,4}

¹ SRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia

² FRC of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, RAS, Chernogolovka, Russia

³ Laboratory of Arctic Mineralogy and Material Sciences, Kola SC RAS, Apatity, Russia

⁴ Geological Institute, Kola SC RAS, Apatity, Russia

Crystal structure of a high calcium eudialyte group member from the Tamazert massif, Morocco, with the following stoichiometry (calculated on 26 atoms Si + Nb, Z = 3): Na_{8.1}K_{0.45}Ln_{0.6}Ca_{7.2}Mn_{2.2}Fe_{1.5}Zr_{3.1}Nb_{0.8–0.9}Si_{25.1–25.2}Cl_{0.3}(CO₃)_{0.4} by X-ray has been studied. The studied mineral is a fragment of a crystal of potentially new high calcium mineral with a complex growth zoning studied earlier. It differs from the latter by higher contents of Ca, Na and Nb. The unit-cell parameters are: $a = 14.1530(1)$ Å, $c = 30.0801(2)$ Å, $V = 5218.1(5)$ Å³, space group P3. The structural model characterized by 163 crystallographic sites is refined to $R = 5.48$ % using 4644 independent reflections with $F > 3\sigma(F)$. The cation distribution over the key sites in the frame of the low symmetry (space group P3) is more detailed as compared to the classical model with rhombohedral R-symmetry.

Keywords: eudialyte group, crystal structure, key positions, primitive cell, Tamazert massif, Morocco

Введение

Симметрия сложных микропористых цирконо- и титаносиликатов зависит от характера упорядочения преимущественно внекаркасных катионов и анионов по позициям крупных пустот и широких кана-

лов. При этом возможно уточнение их кристаллических структур в рамках нескольких пространственных групп (пр. гр.) и выбор моделей структуры с разной степенью детализации. Примером разнообразия кристаллохимических моделей в рамках нескольких

Для цитирования: Расцветаева Р. К., Гридчина В. М., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. VI. Особенности P3-модели аналога высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) // Вестник геонаук. 2025. 8(368). С. 3–8. DOI: 10.19110/geov.2025.8.1

For citation: Rastsvetaeva R. K., Gridchina V. M., Chukanov N. V., Aksenov S. M. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. VI. Features of P3-model structure of the high calcium eudialyte analogue from the Tamazert massif (Morocco). Vestnik of Geosciences, 2025, 8(368), pp. 3–8. DOI: 10.19110/geov.2025.8.1

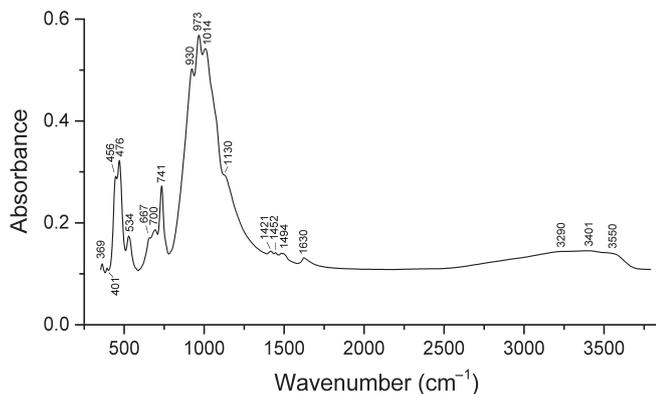


Рис. 1. ИК-спектр изученного минерала

Fig. 1. IR spectrum of the studied mineral

пр. гр. ($R\bar{3}m$, $R3m$, $R3$ и $P3$) является широко распространенный породообразующий минерал аптаитовых нефелиновых сиенитов — цирконосиликат эвдиалит с идеализированной формулой:

$N1-N4Na_{15}M1Ca_6M2Fe_{2+3}Zr_3M3-M4[Si(OH)_2][Si_9O_{27}]_2[Si_3O_9]_2(Cl,H_2O)_2$. Его структура характеризуется сложным гетерополиэдрическим каркасом состава $\{Ca_6Zr_3[Si_3O_9]_2[Si_9O_{27}]_2\}^{24-}$ из кремнекислородных тетраэдрических колец двух типов, объединенных изолированными октаэдрами циркония и уникальными шестичленными кольцами реберно связанных октаэдров кальция, пустоты которого заполнены переменным числом катионов разных размеров и зарядов, а также крупных анионов, анионных групп и молекул воды (Расцветаева и др., 2012; Johnsen et al., 1999a).

Для формирования шестичленных колец октаэдров CaO_6 в структуре минералов группы эвдиалита (МГЭ) необходимо и достаточно содержания 9–10 мас. % CaO (отношение $Ca/Zr = 2$), а структура описывается пр. гр. $R3m$ (или $R\bar{3}m$), в рамках которой содержится одна независимая позиция Ca . Однако МГЭ характеризуются широкими вариациями состава, в том числе Ca .

В минералах с повышенным содержанием Ca при содержании $CaO > 15$ мас. % ($Ca/Zr > 2$, вплоть до $Ca/Zr = 3$) атомы Ca не только полностью заселяют октаэдры шестичленного кольца, но и доминируют в одной или двух внекаркасных позициях. Известны три эвдиалита с повышенным содержанием Ca , найденные в карбонатитах Ковдорского массива — фекличевит, голышевит и моговидит (Расцветаева и др., 2012), структура которых характеризуется пр. гр. $R3m$.

Однако при более низком содержании Ca (до 3–6 мас. % CaO , $Ca/Zr = 1$, вплоть до $1/3$) он преобладает только в трех октаэдрах кольца, в то время как в трех других размещаются заменяющие его Fe , Mn , Ln , Sr , Na и ряд других катионов, что нарушает зеркальную плоскость m и приводит к понижению симметрии до $R3$. Таких минералов в группе эвдиалита известно шесть — онейллит (Johnsen et al., 1999b), раслакит и воронковит (Расцветаева и др., 2012), а также открытые за последние пять лет сэлсурит (Chukanov et al., 2023), сергеванит (Chukanov et al., 2020) и амаблит-(Ce) (Chukanov et al., 2024). Они относятся к структурному типу онейллита, который характеризуется наличием

двух независимых позиций в октаэдрах шестичленных колец с доминированием Ca в одной и смешанным составом в другой.

Можно отметить, что не только в низкокальциевых эвдиалитах, но и в ряде других (например, гидратированных) возможно описание структуры в рамках $R3$ -симметрии из-за упорядочения внекаркасных катионов. Более того, как показали наши недавние исследования ряда низкокальциевых МГЭ, в эвдиалитах возможно и дальнейшее понижение симметрии с переходом от «классической» ромбоэдрической R -решетки к примитивной P -решетке (пр. гр. $P3$).

Поскольку за счет диагональной R -трансляции все три оси третьего порядка взаимозависимы и состав вокруг оси $[00z]$ повторяется трижды со сдвигом вдоль осей на $1/3$ и $2/3$, ряд позиций в рамках высокой симметрии характеризуется смешанным составом, что не позволяет судить о деталях распределения катионов по индивидуальным позициям. Понижение симметрии в ряде низкокальциевых эвдиалитов позволило получить дополнительную информацию о распределении индивидуального катионного состава по позициям шестичленных колец вокруг трех кристаллографически независимых осей третьего порядка, а также в позициях между трансляционно идентичными шестичленными кольцами (Расцветаева и др., 2024a, 2024b; Rastsvetaeva, 2024).

Если понижение симметрии в низкокальциевых эвдиалитах вызвано главным образом упорядочением катионов в октаэдрах шестичленных колец вокруг трех кристаллографически независимых осей третьего порядка, то при однотипности колец в высококальциевых минералах понижение симметрии может быть связано с упорядочением сложного катионного состава по внекаркасным позициям крупных полостей. Нами была впервые изучена структура высококальциевого минерала из щелочного пегматита Тамазерт (Марокко) (Расцветаева и др., 2025), позволившая в рамках $P3$ -модели установить закономерности упорядочения катионов не только в позициях октаэдров шестичленных колец, но и во внекаркасных позициях структуры. Эти результаты обсуждаются в настоящей статье по исследованию его «высокониобиевого» аналога с повышенным содержанием Ca , Na и Nb .

Объект и методы исследования

Образец МГЭ, изученный в настоящей работе, найден в щелочном пегматите массива Тамазерт (Марокко). Этот массив охарактеризован в ряде работ (например, Bouabdli et al., 1988). Здесь кристаллы и зерна изучаемого образца неоднородны по химическому составу и содержат зоны, различающиеся содержанием ниобия (0.6 и 0.8–0.9 атомов) и ряда других элементов. Наиболее низкониобиевый фрагмент монокристалла изучался нами ранее (Расцветаева и др., 2025), а в настоящей работе исследовался фрагмент монокристалла с более высоким содержанием ниобия, менее гидратированный и, соответственно, более высококальциевый.

Химический состав минерала определен методами электронно-зондового микроанализа и газовой хроматографии (для CO_2) и соответствует следующей



стехиометрии (в расчете на 25 атомов Si, $Z = 3$): $\text{Na}_{8.1}\text{K}_{0.45}\text{Ln}_{0.6}\text{Ca}_{7.2}\text{Mn}_{2.2}\text{Fe}_{1.5}\text{Zr}_{3.1}\text{Nb}_{0.8-0.9}\text{Si}_{25.1-25.2}\text{Cl}_{0.3}(\text{CO}_3)_{0.4}$. ИК-спектр минерала (рис. 1), предварительно растертого в агатовой ступке и запрессованного в таблетку с KBr, снят на фурье-спектрометре ALPHA FTIR (Bruker Optics, Германия) в диапазоне волновых чисел 360–3800 cm^{-1} при разрешающей способности 4 cm^{-1} и числе сканирований, равном 16. В качестве образца сравнения использовалась аналогичная таблетка из чистого KBr.

В ИК-спектре изученного в настоящей работе минерала присутствуют полосы основных ОН-групп (при 3550 cm^{-1}), молекул воды (при 3401 и 1630 cm^{-1}), кислотных ОН-групп, предположительно относящихся к ионам оксония (при 3290 cm^{-1}), карбонатных анионных групп (в диапазоне 1420–1500 cm^{-1}), Si-О-валентных колебаний колец тетраэдров (в диапазоне 970–1130 cm^{-1}) и дополнительных тетраэдров SiO_4 , центрирующих девятичленные кольца (при 930 cm^{-1}), а также валентных колебаний связей (Fe, Mn)-О (при 534 cm^{-1}). Остальные полосы в диапазоне 360–800 cm^{-1} относятся к деформационным колебаниям кремнекислородных колец.

Полный прецизионный эксперимент выполнен при комнатной температуре с помощью монокристалльного рентгеновского дифрактометра Rigaku XtaLAB Synergy-DW с изогнутым детектором счета фотонов HyPix-Arc 150° (MoK $_{\alpha}$ -излучение) в диапазоне 2 θ от 1.66 до 70.21° ($-37 \leq h \leq 37$; $-36 \leq k \leq 37$; $-77 \leq l \leq 79$). Измеренные параметры элементарной ячейки составили: $a = 14.1530(1)$, $c = 30.0801(2)$ Å, $V = 5218.1(5)$ Å³. Интегрирование массива из 1 954 094 дифракционных отражений, коррекция на фактор Лоренца и поляризацию излучения проводились с использованием комплекта программ CrysAlis Pro 1.171.43.105a (Rigaku Oxford Diffraction, 2022). Модель структуры из 163 позиций в пр. гр. $P3$ была получена с помощью процедуры «коррекции фаз», разработанной в рамках программы AREN (Андрианов, 1987). При этом в качестве стартового набора использованы координаты 34 позиций каркаса фекличевита, наиболее близкого по составу высококальциевого эвдиалита. После распределения элементов по позициям в соответствии с данными химического состава и уточнения модели до 7 % часть позиций (расщепленных и с неполной заселенностью) были найдены из серии разностных синтезов электронной плотности. В результате изотропно-анизотропно уточнения всей модели R -фактор снизился до 5.48 % (4 644 отражений с $F > 3\sigma(F)$). Все расчеты выполнены с использованием системы кристаллографических программ AREN (Андрианов, 1987).

В таблицах 1 и 2 приводятся уточненные структурные параметры позиций катионов и характеристики их координационных полиэдров для некоторых ключевых фрагментов структуры, понижающих симметрию минерала.

Обсуждение результатов

Изученные нами «низкониобиевый» и «высоконниобиевый» фрагменты кристалла из пегматитов Марокко — следствие ростовой зональности минерала, причём не концентрической, как обычно, а мозаичной. Механизм её образования не вполне понятен.

При раздавливании кристалл, скорее всего, распадается вдоль границ между зонами, и хотя визуально фрагменты разного состава и разной структуры идентичны, тем не менее эти фрагменты различаются как по составу, так и по упорядочению катионов в позициях структуры.

В «высоконниобиевом» марокканском эвдиалите содержится более семи атомов Ca и двух атомов Mn, что предполагает доминирование Ca во всех независимых октаэдрах шестичленного кольца и присутствие в структуре трех однотипных [Ca-Ca] шестичленных колец. Однако исследование в рамках симметрии $P3$ показало, что это не совсем так (табл. 1). С учетом количества электронов и величины атомных смещений в одной из шести независимых позиций установлено замещение кальция марганцем, и таким образом, в данной структуре только два шестичленных кольца имеют состав [Ca-Ca], а третье кольцо — онейлитового типа, состоящее из чередующихся Ca- и Mn-октаэдров. Подобное частичное замещение кальция марганцем в шестичленном кольце, по-видимому связанное с марганцевой минерализацией массива, установлено ранее и в «низкониобиевом» фрагменте, с той лишь разницей, что кольца онейлитового типа [Ca-Mn] в обоих фрагментах приурочены к разным осям третьего порядка (рис. 2).

Хотя присутствие кольца состава [Mn-Ca] вызывает локальное нарушение R -решетки, основной вклад в понижение симметрии данного минерала, аналогично изученному ранее, вносит упорядочение крупных катионов по внекаркасным $N1-N4$ -позициям (шарики на рис. 2) между послойно расположенными шестичленными кольцами и изолированными Zr-октаэдрами. Эти позиции в большинстве представителей группы эвдиалита заполнены атомами Na и H_3O . При этом полиэдры $N3$ и $N4$, примыкающие к шестичленным кольцам, наиболее изоморфно-емкие и могут концентрировать еще и Ca, Sr, K, Ln. В высококальциевых эвдиалитах они заполняются преимущественно кальцием, формируя совместно с октаэдрами шестерного кольца тройной кальциевый слой. Однако в данной структуре этот слой гетерогенный и включает октаэдры с доминированием La. Более крупный 7-вершинник занят атомами K со средним расстоянием K—O = 2.69 Å. Такие же полиэдры найдены и в Nb-дефицитном аналоге, однако их положение взаимно обратное. Кроме того, CO_3 -группа на оси третьего порядка, объединяющая по три La-полиэдра в кластеры, в данном фрагменте отсутствует, а в калиевом 7-вершиннике такую объединяющую роль играет анион Cl. Избыточный Ca (два атома, не вошедшие в шестичленные кольца) также образует семивершинники. Однако их положение существенно иное: они занимают $N3$ - и $N4$ -позиции в отличие от структуры Nb-дефицитного аналога с Ca в позициях $N1$ и $N2$, примыкающих к изолированным Zr-октаэдрам и занятых атомами Na.

В связи с меньшей степенью гидратированности в данном образце часть позиций H_3O занята атомами Na (рис. 2).

Как и в Nb-дефицитном образце, в структуре данного минерала октаэдры Nb и тетраэдры Si статистически чередуются в позициях $M3$ и $M4$ на оси третьего порядка вблизи центров 9-членных кремнекислородных колец, но с более высоким коэффициентом за-

**Таблица 1.** Координаты, параметры атомных смещений ($B_{экр/изо}$, Å²), кратность (Q) и заселенность в некоторых ключевых позициях структуры**Table 1.** Atom coordinates, isotropic atomic displacement parameters ($B_{eq/iso}$, Å²) multiplicity (Q) and composition in some key-sites

Позиция Site	x	y	z	Q	$B_{экр/изо}^* B_{eq/iso}^*$	Состав Composition
Z1	-0.0034(2)	0.5020(2)	0.5001(1)	3	1.75(5)	Zr
Z2	0.3389(2)	0.1684(2)	0.1685(1)	3	1.30(5)	Zr
Z3	0.1669(2)	0.3390(2)	0.8342(1)	3	1.16(5)	Zr
M1.1	0.0052(3)	0.2645(3)	0.0003(1)	3	1.3(1)	Ca
M1.2	0.6694(5)	0.5978(4)	0.3340(1)	3	1.9(1)	Ca
M1.3	0.0709(3)	0.3993(3)	0.6665(1)	3	1.3(1)	Ca
M1.4	0.2530(2)	0.2569(2)	0.0005(1)	3	0.80(3)	Mn
M1.5	0.3908(3)	0.3311(4)	0.3335(1)	3	1.5(1)	Ca
M1.6	0.3271(3)	0.4036(3)	0.6667(1)	3	1.3(1)	Ca
M2.1a	0.308(1)	0.1707(8)	0.6617(3)	3	2.22(6)*	Fe _{0.5}
M2.1b	0.3877(7)	0.1959(6)	0.6715(2)	3	2.2(1)	Mn _{0.5}
M2.2	0.1681(6)	0.3411(7)	0.3336(2)	3	2.8(1)	Fe
M2.3	0.5126(2)	0.0342(2)	-0.0004(1)	3	1.2(1)	Mn
M3.1a	0	0	0.6087(2)	1	2.6(1)	Nb _{0.4}
M3.1b	0	0	0.639(1)	1	2.2(2)*	Nb _{0.2}
M3.1c	0	0	0.558(1)	1	2.8(3)*	Nb _{0.1}
M3.2	0.3334	0.6667	0.2963(3)	1	2.3(1)	Nb _{0.4}
M3.3	0.6667	0.3334	0.9616(3)	1	2.0(2)	Nb _{0.5}
M4.1	0	0	0.3846(2)	1	2.9(3)	Nb _{0.2}
M4.2	0.3334	0.6667	0.0364(2)	1	2.1(1)	Nb _{0.5}
M4.3	0.6667	0.3334	0.7048(3)	1	2.5(1)	Nb _{0.4}
N3.2	0.2324(4)	0.4652(4)	0.9516(1)	3	1.8(1)	Ca
N3.3	0.5639(4)	0.4319(4)	0.6189(1)	3	2.2(1)	Ca
N4.1	0.075(2)	0.160(3)	0.727(1)	3	3.7(2)*	K _{0.4}
N4.3	0.4687(2)	0.2355(2)	0.0485(1)	3	3.9(3)	La _{0.6}
Cl	0	0	0.7794(9)	1	4.3(3)	Cl _{0.5}

Таблица 2. Состав ($Z = 1$) в некоторых ключевых позициях и характеристики координационных полиэдров катионов**Table 2.** Composition ($Z = 1$) in some key sites and characteristics of cationic coordination polyhedra

Позиция Site	Состав Composition	КЧ / CN	Расстояния катион — анион (Å) / Cation — anion distances (Å)		
			Минимальное / Minimal	Максимальное / Maximal	Среднее / Mean
Z1	Zr3	6	2.05(1)	2.11(1)	2.08
Z2	Zr3	6	1.94(1)	2.13(2)	2.06
Z3	Zr3	6	2.04(2)	2.19(2)	2.08
M1.1	Ca3	6	2.17(1)	2.45(1)	2.28
M1.2	Ca3	6	2.17(2)	2.45(1)	2.32
M1.3	Ca3	6	2.27(1)	2.45(3)	2.36
M1.4	Mn3	6	2.18(1)	2.37(1)	2.30
M1.5	Ca3	6	2.08(2)	2.45(1)	2.30
M1.6	Ca3	6	2.00(1)	2.50(1)	2.33
M2.1a	Fe1.5	5	1.90(2)	2.31(2)	2.09
M2.1b	Mn1.5	4	2.04(2)	2.24(2)	2.14
M2.2	Fe3	4	1.96(1)	2.31(2)	2.14
M2.3	Mn3	5	2.03(2)	2.42(2)	2.21
N3.2	Ca3	7	2.37(4)	2.94(1)	2.75
N3.3	Ca3	7	2.43(1)	2.90(1)	2.69
N4.1	K1.2	7	2.51(3)	2.85(3)	2.69
N4.3	La1.8	9	2.49(2)	2.99(2)	2.59

КЧ — координационное число; CN — coordination number.

полнения октаэдров и меньшим — тетраэдров. В отличие от Nb-дефицитного образца позиция M3.1 на оси [00z] расщеплена на три (табл. 2). Суммарная заселенность этой позиции максимальная и составляет 0.7 Nb, а позиция Si вакансионна, что также является существенным фактором, понижающим симметрию мине-

рала. Вакансия Si в M3-позиции наблюдалась и в другом фрагменте, но не на оси [2/3 1/3 z], а на [00z]-оси.

Можно отметить, что в целом заполнение позиций в «высокониобиевом» фрагменте более упорядоченно, без смешанной заселенности и с минимальным количеством расщепленных позиций, что, возможно,

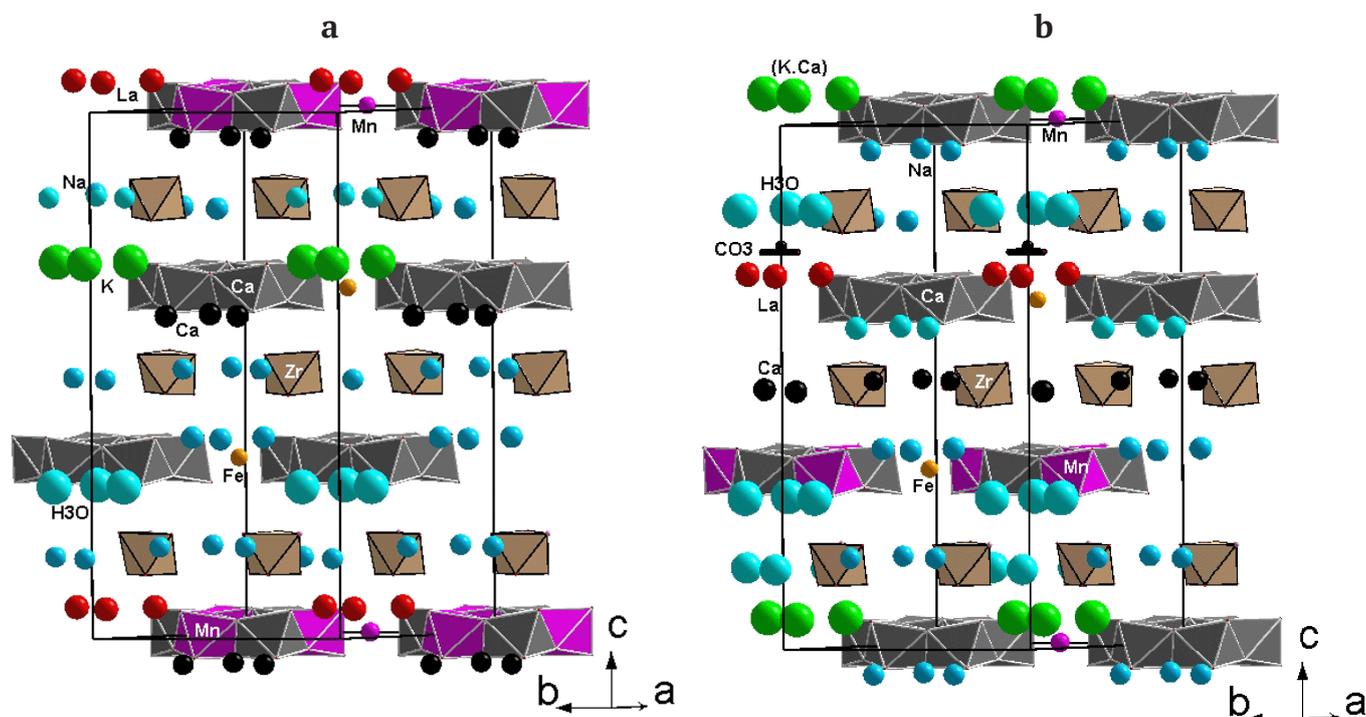


Рис. 2. Послойное распределение крупных катионов (шарики) в $P3$ -моделях высококальциевого эвдиалита из массива Тамазерт (Марокко) в «низкониобиевом» (Расцветева и др., 2025) (а) и «высокониобиевом» (б) фрагментах монокристалла

Fig. 2. Layer-like distribution of cations in the $P3$ -models in the “low-niobium” (Rastsvetaeva et al., 2025) (a) and “high-niobium” (b) single-crystal fragments of high calcium EGM from Tamazeght, Morocco

свидетельствует о более равновесных условиях роста этого участка кристалла.

Выводы

Таким образом, изученный нами минерал из массива Тамазерт (Марокко) — второй высококальциевый представитель группы эвдиалита с пр. гр. $P3$. Он является «высокониобиевым» (0.83 атома) фрагментом монокристалла наряду с изученным ранее Nb-дефицитным фрагментом (0.6 атома, $Z = 3$). Состав обоих фрагментов, несмотря на некоторые различия и частичное перераспределение по позициям, схож, что обуславливает и их структурное родство. Особенностью обоих высококальциевых эвдиалитов является однотипность двух шестичленных колец из атомов Ca и присутствие Mn в октаэдре третьего кольца. Существенное понижение симметрии в исследованных минералах проявляется главным образом в упорядочении избыточных атомов Ca и ряда других крупных катионов по внекаркасным $N1-N4$ -позициям.

Установленное рентгеноструктурным анализом перераспределение части катионов по структурным позициям обоих фрагментов, по-видимому, связано с флуктуациями условий кристаллизации в процессе роста кристалла.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования ЦКП НИЦ «Курчатовский институт». Анализ химического состава и ИК-спектроскопическое исследование выполнены в соответствии с темой государственного задания (номер государственной регистрации 124013100858-3).

Литература / References

- Андрянов 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)
- Расцветева Р. 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. Nizhny Novgorod: Publ. of the Nizhny Novgorod State Univ., 2012, 230 pp. (in Russian)
- Расцветева Р. К., Аксенов С. М., Гридчина В. М., Чуканов Н. В. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. I. Упорядоченная модель распределения катионов в кристаллической структуре амаблита-(Ce) в рамках $P3$ -симметрии // Кристаллография. 2024а. № 5. С. 788—795. DOI: 10.31857/S0023476124050047, EDN: ZDOJHZ.
- Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Gridchina V. M., Chukanov N. V. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. I. A model of ordered cation arrangement in the crystal structure of amableite-(Ce) using the $P3$ symmetry. Crystallography Reports, 2024a, V. 69, No. 5, pp. 660—667.
- Расцветева Р. К., Аксенов С. М., Гридчина В. М., Чуканов Н. В. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. II. Роль $M2$ -позиции в упорядоченной $P3$ -модели высокоциркониевого члена группы эвдиалита // Кристаллография. 2024б. № 6. С. 954—959. DOI: 10.31857/S0023476124060043, EDN: YHXMPE.

- Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Gridchina V. M., Chukanov N. V. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. II. A role of M2-position in ordered P3-model of Zr-rich member eudialyte group. *Crystallography Reports*, 2024b, V. 69, No. 6, pp. 819–825.
- Расцветоваева Р. К., Гридчина В. М., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Диссимметризация в минералах группы эвдиалита. V. Кристаллическая структура потенциально нового минерала из пегматитов Марокко — первого высококальциевого представителя с P3-симметрией // *Кристаллография*. 2025. Т. 70. № 5, с. 736–743. DOI: 10.31857/S0023476125050045
- Rastsvetaeva R. K., Gridchina V. M., Chukanov N. V., Aksenov S. M. desymmetrization in eudialyte-group minerals. V. Crystal structure of potentially new mineral from Marocco pegmatite — first highcalcium member with P3-symmetry. *Crystallography Reports*, 2025, V. 70, No. 5. pp. 736–743. (in Russian)
- Bouabdli A., Dupuy C., Dostal J. Geochemistry of mesozoic alkaline lamprophyres and related rocks from the Tamazert massif, High Atlas (Marocco) // *Lithos*. 1988. V. 22. P. 43–58.
- Chukanov N. V., Aksenov S. M., Pekov I. V., Belakovskiy D. I., Vozchikova S. A., Britvin S. N. Sergevanite, $\text{Na}_{15}(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_5\cdot\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // *Canadian Mineralogist*. 2020. V. 58. P. 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, $(\text{H}_2\text{O})_{12}\text{Na}_3(\text{Ca}_3\text{Mn}_3)(\text{Na}_2\text{Fe})\text{Zr}_3\text{Si}[\text{Si}_{24}\text{O}_{69}(\text{OH})_3](\text{OH})\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // *Mineralogical Magazine*. 2023. V. 87. P. 241–251. DOI: 10.1180/mgm.2022.136.
- Chukanov N. V., Zolotarev A. A., Schäfer Ch., Varlamov D. A., Pekov I. V., Vigasina M. F., Belakovskiy D. I., Aksenov S. M., Vozchikova S. A., Britvin S. N. Amableite-(Ce), $\text{Na}_{15}[(\text{Ce}_{1.5}\text{Na}_{1.5})\text{Mn}_3]\text{Mn}_2\text{Zr}_3\text{Si}[\text{Si}_{24}\text{O}_{69}(\text{OH})_3](\text{OH})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$, a new eudialyte-group mineral from Saint-Amable Sill, Québec, Canada // *Mineralogical Magazine*. 2024. DOI: 10.1180/mgm.2024.26.
- Johnsen O., Grice J. D., Gault R. A. Oneillite: a new ca-deficient and REE-rich member of the eudialyte group from mont Saint-Hilaire. Quebec, Canada // *Canadian Mineral*. 1999a. V. 37. P. 1295–1301.
- Johnsen, O.; Grice, J. D.; Gault, R. A. The crystal chemistry of the eudialyte group. *Canad. Mineral*, 1999b. V.37(4), P. 865–891.
- Rastsvetaeva R. K., Gridchina V. M., Aksenov S. M., Chukanov N. V. Dissymmetrization in eudialyte-group minerals. III. Features of the high ordered voronkovite P3-structure // *Crystallography Reports*, 2024. V. 69. No. 7. P. 1045–1053. DOI: 10.1134/S1063774524602193
- Rigaku Oxford Diffraction*, 2022, CrysAlisPro Software system, version 1.171.43.105a, Rigaku Oxford Diffraction, Yarnton, UK.

Поступила в редакцию / Received 21.03.2025