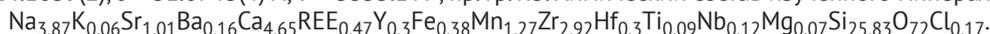


Кристаллохимические особенности обогащенного стронцием аквалитоподобного минерала из Кондерского массива

Р. К. Расцветова

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

Методами электронно-зондового микроанализа и рентгеноструктурного анализа исследован обогащенный стронцием минерал группы эвдиалита из Кондерского щелочного массива (Южная Якутия). Изученный образец найден А. П. Хомяковым. Его кристаллическая структура уточнена до итогового фактора расходимости $R = 3.9\%$ в анизотропном приближении атомных смещений с использованием 2188 независимых рефлексов с $F > 3\sigma(F)$. Параметры элементарной тригональной ячейки: $a = 14.1039(2)$, $c = 31.0743(4)$ Å, $V = 5353.1$ Å³, пр. гр. $R\bar{3}$. Химический состав изученного минерала ($Z = 3$):



Обсуждаются кристаллохимические особенности минерала и его место среди гидратированных аквалитоподобных эвдиалитов.

Ключевые слова: аквалит, группа эвдиалита, кристаллическая структура, изоморфизм, Кондерский щелочной массив.

Crystal chemistry features of the Sr-rich aqualite-like mineral from the Konder alkaline complex

R. K. Rastsvetaeva

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

A hydrated Sr-rich member of the eudialyte-group mineral from Konder (Southern Yakutia) alkaline complex has been investigated by the methods of electron probe microanalysis and X-ray diffraction. The crystal structure was refined to $R = 3.9\%$ in the anisotropic approximation of atomic displacements using 2188 independent reflections with $F > 3\sigma(F)$. The unit-cell parameters are: $a = 14.1039(2)$, $c = 31.0743(4)$ Å, $V = 5353.1$ Å³; the space group $R\bar{3}$. The chemical composition of the studied mineral ($Z = 3$):



The crystal chemistry features of the mineral and its place among hydrated eudialytes are discussed.

Keywords: aqualite, eudialyte group, crystal structure, isomorphism, Konder alkaline complex.

Введение

Аквалит $(\text{H}_3\text{O})_8(\text{Na}, \text{K}, \text{Sr})_5\text{Ca}_6\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{66}(\text{OH})_9\text{Cl}$ — гидратированный минерал, открытый А. П. Хомяковым в пегматитах Инаглинского щелочного массива (Республика Саха (Якутия)) [8], характеризуется низким содержанием щелочных элементов при высоком содержании H_2O . В природе так называемые Н-эвдиалиты относительно редки и образуются в результате ионного обмена Na^+ на ион оксония H_3O^+ . Высокое содержание H_3O^+ установлено также в илюхините $(\text{H}_3\text{O}, \text{Na})_{14}\text{Ca}_6\text{Mn}_2\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [12] и при общем доминировании натрия в позициях внекаркасных катионов — в икраните $(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})_{15}(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{REE})_6\text{Fe}^{3+}_2\text{Zr}_3(\square, \text{Zr})(\square, \text{Si})\text{Si}_{24}\text{O}_{66}(\text{O}, \text{OH})_6\text{Cl} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [4, 12]. Известны также аквалитоподобные минералы из Хибинского, Прихубсугульского и Кондерского массивов [14]. Эти Н-эвдиалиты разного химического состава и происхождения отличаются от типичных эвдиалитов низким содержанием катионов Na и высокой гидратированностью (до 10 мас. % H_2O) и характеризуются разной степенью замещения Na на H_3O . Кроме

Na в них содержится ряд других крупных элементов; ряд минералов обогащен калием, стронцием, барием или редкими землями (табл. 1). Голотипный аквалит содержит повышенное количество K. Недавно был найден в Ковдорском массиве калиево-доминантный образец аквалита [7]. Наиболее высокие содержания Ba обнаруживаются в составе Н-эвдиалитов из карбонатитов Ковдорского, Кондерского и Инаглинского массивов [8, 14], что может быть связано с геохимическими особенностями среды их преобразования на гидротермальной стадии [2].

Разные компоненты, находящиеся в цеолитоподобных полостях, имеют возможность «подбирать» себе энергетически выгодные позиции для компенсации зарядов при гетеровалентных замещениях. При этом они статистически занимают позиции с неполной заселенностью, находящиеся на коротких расстояниях друг от друга, и при определенных условиях могут упорядочиваться по этим позициям. Калиево-доминантный образец характеризуется максимальной упорядоченностью крупных катионов в полостях каркаса [7].

Для цитирования: Расцветова Р. К. Кристаллохимические особенности обогащенного стронцием аквалитоподобного минерала из Кондерского массива // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 38–43. DOI: 10.19110/geov.2022.6.4.

For citation: Rastsvetaeva R. K. Crystal chemistry features of the Sr-rich aqualite-like mineral from the Konder alkaline complex. Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 38–43, doi: 10.19110/geov.2022.6.4.



Таблица 1. Содержание крупных катионов ($Z = 3$) в аквалитоподобных минералах группы эвдиалита из разных массивов

Table 1. Large cation composition ($Z = 3$) in aqualite-like minerals of eudialyte group from different massifs

Минерал (массив) / Mineral (massif)	Элементы / Elements				
	Na	K	Ba	Sr	Ce
Образец 1 (Инагли) / Sample 1 (Inagli)	7.4	0.53	0.38	0.63	0.16
Образец 3 (Хибинь) / Sample 3 (Khibiny)	4.4	0.21	0.04	0.48	0.2
Образец 4 (Хибинь) / Sample 4 (Khibiny)	3.66	0.2	0.03	0.63	0.22
Образец 5 (Хубсугуль) / Sample 5 (Khubsugul)	4.3	0.3	—	0.05	0.63
Образец 6 (Кондер) / Sample 6 (Konder)	3.87	0.06	0.16	1.07	0.47
Аквалит (Инагли) / Aqualite (Inagli)	2.74	1.2	0.46	0.49	0.19
К-аналог аквалита (Ковдор) / K-analogue of aqualite (Kondor)	3.7–5.3	1.4–1.8	0.5	0.4	0.4

Примечание: образцы 1–6 [14], аквалит [8], К — аналог аквалита [7].

Note: Образец 1–6 [14], aqualite [8], K — analogue of aqualite [7].

Чаще всего Sr, изоморфно замещающий Na, является обычной примесью в минералах группы эвдиалита (МГЭ) из апаитовых пегматитов, и его содержание не превышает 1 атома на формулу. В ранее опубликованной статье [5] мы обсуждали видообразующую роль Sr в ряде высокостронциевых эвдиалитов из Ловозерского, Хибинского массивов, а также из массивов Одихинча и Сент-Илер. Эти минералы содержат 2–3 атома Sr на формулу. Все они высокониобиевые и содержат Sr в N3- или N4-позициях, а также Cl, молекулы воды или CO₃-группы в одной из внекаркасных X-позиций на оси 3-го порядка. Особенностью состава этих минералов является отсутствие оксониевых групп, которые могут замещать крупные катионы, главным образом в двух из пяти N-позиций (N3 и N4).

В настоящей работе изучен образец из Кондера, который характеризуется повышенным содержанием Sr (SrO = 2.7–3.8 мас. %) при одновременном содержании BaO = 0.67–0.81 мас. %, что необычно для эвдиалитов, отсутствием хлора, фтора и CO₃-групп. Его отличает также высокая степень замещения крупных катионов на H₂O-группы.

Объект, методы и результаты исследования

Изученный в настоящей работе минерал был обнаружен А. П. Хомяковым на Восточном Алдане Кондерского щелочного массива (образец 3398).

Химический состав образца определен на волновом дисперсионном микроанализаторе Jeol 733 и характеризуется низким содержанием катионов Na и высокой гидратированностью (до 10 мас. % H₂O). Состав, пересчитанный на сумму высокозарядных катионов Si + Ti + Zr + Nb + Hf = 29-х, где х — содержание вакансий, приводит к следующей эмпирической формуле ($Z=3$): Na_{3.87}K_{0.06}Ca_{4.65}Sr_{1.07}Ba_{0.16}Mg_{0.07}Mn_{1.27}Fe_{0.38}(La_{0.08}Ce_{0.22}Nd_{0.09}Gd_{0.03}Er_{0.05})Y_{0.32}Zr_{2.92}Ti_{0.09}Hf_{0.03}Si_{25.83}Nb_{0.12}Cl_{0.17}(H₂O)_x(H₂O)_y(OH)_zO₇₂. Содержание воды определено как разность между 100 % и общей суммой кризондового анализа и составляет 9.99 %. Вычисленная плотность минерала — 2.675 г/см³.

Дифракционный эксперимент от монокристалла размером ~ 0.2 × 0.2 × 0.3 мм³ получен в университете г. Дурхам (Великобритания) на дифрактометре SMART

1000 CCD (MoKα; λ = 0.71073 Å) при пониженной (103K) и комнатной температурах. Поглощение учтено эмпирически при обработке эксперимента по программе SADABS. В полученном экспериментальном наборе в пределах до sin θ/λ < 0.71 содержалось 6169 рефлексов $F > 3\sigma(F)$ (область съемки: -20 < h < 20; -20 < k < 17; -40 < l < 44). Число независимых отражений составляло 2188 $F > 3\sigma(F)$ при R-факторе усреднения эквивалентных отражений 0.016.

Минерал тригональный, с параметрами элементарной ячейки при T = 103K: a = 14.1039(2), c = 31.0743(4) Å, V = 5353.1(2) Å³; при комнатной температуре: a = 14.118(2), c = 31.13(1) Å, V = 5373.3 Å³, пр. гр. R3̄.

Для уточнения структуры в качестве стартовых использованы координаты атомов Zr, Si и Ca каркаса, а также входящих в их окружение атомов O, (Na, Fe)-декаатионированного эвдиалита [3]. Позиции внекаркасных атомов на оси 3-го порядка M3, M4, X1, X2 и в полостях N1 — N8 найдены из серии разностных синтезов электронной плотности. Уточнение состава ряда позиций проводилось с учетом смешанных кривых атомного рассеяния и частичной заселенности. Кристаллическая структура уточнена до финального фактора расходимости R = 3.9 % по 2188 отражениям $F > 3\sigma(F)$ в анизотропном приближении атомных смещений. Все расчеты выполнены с использованием системы кристаллографических программ AREN [1]. Координаты внекаркасных атомов, параметры их атомных смещений, заселенности и состав позиций приведены в табл. 2. Структурные данные для атомов Si каркаса и входящих в их координацию атомов кислорода опущены, т. к. они близки к соответствующим значениям в (Na, Fe)-декаатионированном эвдиалите и в данной статье не обсуждаются.

Установленные кристаллохимические особенности минерала отражены в его кристаллохимической формуле ($Z = 3$): [(H₂O)_{8.53}Na_{3.51}Sr_{0.55}Ce_{0.45}Y_{0.3}Ba_{0.15}K_{0.06}]_{Σ13.55} [Ca_{2.25}Sr_{0.45}Na_{0.3}] [Ca_{2.4}Mn_{0.6}] [Zr_{2.97}Hf_{0.03}] [Mn_{0.64}Fe_{0.38}][(Si_{0.9})(Nb_{0.1})] [(Si_{0.49})(Ti_{0.19})] [Si₃O₉]₂[Si₉O_{25.5}(O, OH)_{1.5}]₂(OH)_{2.3}·2.8H₂O.

Обсуждение результатов

Минерал в целом изоструктурен, с высокооксониевыми МГЭ [14]. Однако в ряде ключевых позиций есть особенности состава и строения, присущие изу-

Таблица 2. Координаты, параметры эквивалентных/изотропных атомных смещений ($B_{экв/изо}$, Å), состав, заселенность (q) и кратность (Q) позиций во внекаркасной части структуры обогащенного стронцием аквалитоподобного эвдиалита из Кондерского массива

Table 2. Atom coordinates, equivalent/isotropic atomic displacement parameters ($B_{eq/iso}$, Å²), composition, site occupancy factors (q) and site multiplicities (Q) in the extraframework part of the crystal structure of Sr-rich aqualite-like mineral from the Konder complex

Позиция Site	Координаты атомов / Atom coordinates			Q	q	$B_{экв/изо}^*$ $B_{eq/iso}^*$	Состав ($Z^{**} = 3$) Composition ($Z^{**} = 3$)
	x	y	z				
Z	0.3329(1)	0.1667(1)	0.1669(1)	9	1	1.91(2)	2.97Zr + 0.03Hf
M1.1	0.2654(1)	0.0015(1)	0.0003(1)	9	1	1.54(3)	2.25Ca + 0.45Sr + 0.3Na
M1.2	0.2656(1)	0.2641(1)	0.0003(1)	9	1	1.30(3)	2.4Ca + 0.6Mn
N1	0.1106(3)	0.2202(3)	0.1515(1)	9	1	3.70(5)	2.79Na + 0.15Ba + 0.06K
N2a	0.5605(2)	0.4386(2)	0.1796(1)	9	0.80(2)	2.98(6)	1.13H ₃ O + 0.72Na + 0.55Sr
N2b	0.603(3)	0.204(4)	0.160(1)	9	0.20(2)	3.7(4)	0.6H ₃ O
N3	0.2452(5)	0.4894(8)	-0.0477(2)	9	1	3.06(6)*	2.7H ₃ O + 0.3Y
N4a	0.4697(2)	0.2352(2)	0.0493(1)	9	0.15(1)	2.15(5)	0.45Ce
N4b	0.544(2)	0.270(3)	0.060(1)	9	0.44(2)	6.5(2)	1.32 H ₃ O
N4c	0.528(2)	0.265(2)	0.0296(6)	9	0.41(2)	4.4(3)	1.23H ₃ O
N5	0.282(9)	0.579(7)	0.179(2)	9	0.20(2)	6.0(5)*	0.60 H ₃ O
N6	0.590(8)	0.184(8)	0.003(3)	9	0.19(2)	5.7(3)	0.38OH
N7	0.406(1)	0.593(1)	0.0033(4)	9	1	3.51(9)*	1.6H ₃ O + 1.4OH
N8	0	0	-0.016(8)	3	0.20(4)	4.9(9)*	0.2H ₃ O
M2	0.0231(3)	0.5110(5)	0.0021(2)	9	0.34(2)	2.01(5)	0.65Mn + 0.38Fe
M3a	0.3333	0.6667	0.2411(5)	3	0.29(2)	2.10(3)	0.29Si
M3b	0.3333	0.6667	0.2770(4)	3	0.20(1)	1.41(3)	0.20Si
M3c	0.3333	0.6667	0.3030(3)	3	0.19(1)	0.6(3)	0.1Ti + 0.07Mg + 0.02Nb
M4a	0.3333	0.6667	0.0366(4)	3	0.10(2)	2.0(2)	0.1Nb
M4b	0.3333	0.6667	0.0658(3)	3	0.41(3)	1.3(1)	0.43Si
M4c	0.3333	0.6667	0.0935(3)	3	0.49(3)	2.2(2)	0.49Si
OH1	0.3333	0.6667	0.012(2)	3	0.41(4)	7.1(4)	0.43OH
OH2	0.3333	0.6667	0.142(1)	3	0.49(5)	4.5(4)	0.49OH
OH3	0.3333	0.6667	0.191(4)	3	0.29(4)	2.9(7)	0.29OH
OH4	0.3333	0.6667	0.328 (2)	3	0.20(6)	4.6(9)	0.20OH
X1a	0	0	0.1879(3)	3	0.68(4)	5.3(3)	0.68H ₂ O
X1b	0	0	0.2026(3)	3	0.31(3)	4.1(7)	0.31H ₂ O
X1c	0	0	0.298(3)	3	0.33(3)	5.8(5)	0.33H ₂ O
X2a	0.6667	0.3333	0.147(3)	3	0.57(7)	4.0(7)	0.57H ₂ O
X2b	0.6667	0.3333	0.072(1)	3	0.23(5)	1.4(8)	0.23H ₂ O

Примечание: **число формульных единиц.

Note: **number of formula units.

ченному в настоящей работе образцу. При пониженном содержании Ca (< 6 атомов на формулу, $Z = 3$) обычно происходит упорядочение атомов Ca и других элементов, дополняющих его количество до 6 атомов. При этом единая позиция Ca распадается на 2 независимые позиции в M1-октаэдрах 6-членного кольца с понижением симметрии от $R3m$ до $R3$ [4, 10, 12, 13]. В данной структуре Ca доминирует в обоих близких по размерам и составу M1-октаэдрах, а среди дополняющих элементов наряду с Mn и Na присутствует и Sr. Расстояния в M1.1- и M1.2-октаэдрах равны соответственно 2.269(9) — 2.385(8) Å (среднее значение 2.33 Å) и 2.245(8) — 2.43(1) Å (среднее значение 2.34 Å), а понижение симметрии вызвано в основном другими причинами, которые будут рассмотрены ниже.

Ключевая M2-позиция находится вблизи центра квадрата, образованного параллельными ребрами M1O₆-октаэдров соседних шестичленных колец и дополненного OH-группой до 5-вершинника с расстоя-

ниями «катион — анион» в пределах 2.005(4) — 2.347(9) (среднее 2.25 Å). Она занята атомами Mn и Fe и существенно вакансионна.

Ключевые позиции M3 и M4 находятся на оси третьего порядка вблизи центров девятичленных колец [Si₉O₂₇] по обе стороны от их плоскостей. Каждая из них расщепляется на три подпозиции с короткими расстояниями друг до друга: M3a — M3b = 1.11, M3b — M3c = 0.80(1), M4a — M4b = 0.90(1), M4b — M4c = 0.86 Å соответственно. Эти подпозиции статистически заняты почти полностью атомами Si, с небольшой добавкой атомов Nb, Mg и Ti в октаэдрической координации с расстояниями «катион—анион» в M3- и M4-октаэдрах 2.00—2.09 и 1.93—2.06 Å соответственно.

Позиции крупных катионов находятся в полостях N(1—8) (рис. 1, 2). Кондерский образец характеризуется слабой упорядоченностью состава по позициям, которые либо не расщепляются (N1, N3, N5), либо содержат смешанный состав катионов в некоторых расщепленных позициях (N2a).



Атомы Na с примесью атомов Ba и K целиком заполняют 9-вершинник в полости N1 с расстояниями «катион — анион» в пределах 2.48–2.92 (среднее $\langle N1 - O \rangle = 2.66 \text{ \AA}$). Атомы Na и Sr наряду с доминирующими H_2O -группами располагаются в одной из двух расщепленных N2-подпозиций (N2a — N2b = 1.17(4) Å). Причем Sr-содержащий полиэдр — 8-вершинник с расстояниями в пределах 2.42–2.86 (среднее $\langle N2 - O \rangle = 2.64 \text{ \AA}$), в то время как вторая подпозиция (N2b) заселена H_2O -группой, образующей 6-вершинник со средним расстоянием 2.68 Å. Полости N3 и N4 заняты оксидом с примесью небольшого количества редкоземельных элементов в 7-вершиннике с расстояниями N4a — O = 2.45(1) — 3.102(7) Å. Позиция N5 заполнена H_2O -группами, а также OH-группами в вершинах дополнительных Si-тетраэдров (подпозиции M3a и M4c). Заселенность позиций N6 и N7 оксониевыми группировками и OH-группами, входящими в координацию Nb- и Ti-октаэдров, коррелирует с занятостью позиции M2, которая в данном минерале существенно ваканционна.

В наименьшей степени заселена позиция № 8. Она находится в центре замкнутой полости в середине шестерного кольца, прикрытой сверху и снизу тройными кольцами $[Si_3O_9]$ (рис. 2). Эта компактная полость может быть заселена крупными катионами K и молекулами H_2O , но в большинстве ранее изученных минералов остается вакантной [4]. В гидратированных образцах № 3 из Хибинского массива [14] и K-доминантного аналога аквалита из Ковдорского массива в позиции с координатами [0 0 0] в этой полости содержится 0.22 и 0.28 H_3O^+ соответственно. В данном образце она также частично занята H_2O -молекулами в 12-вершиннике с расстояниями в пределах 2.5(1)–3.3(2) Å.

Гидратация, не связанная с выщелачиванием катионов Na, происходит в позициях дополнительных анионов X1 и X2 на оси 3-го порядка. В изученном нами образце расположенные в этих позициях ионы Cl замещены на молекулы воды полностью, в отличие от высокостронциевых минералов, например голотипного тасекиита из Илимаусака с двумя хлордоминантными X-позициями [11].

Заключение

Образец из Кондерского массива характеризуется сравнительно более низким содержанием Na и высокой степенью гидратированности среди H-эвдиалитов, в которых замещение крупных катионов происходит главным образом на ионы H_3O . Присутствие H_2O в аквалите и H-эвдиалитах подтверждается и рамановскими спектрами, которые оказались значительно более чувствительными, чем ИК-спектры, к присутствию гидратированных форм протона вследствие аномально высокой поляризуемости связей O–H в этих комплексах [9, 6]. В данном образце H_2O доминирует среди внутрикаркасных катионов, заполняя все крупнокатионные позиции, кроме N1.

Изученный образец эвдиалита из Кондерского массива содержит существенное количество атомов Sr (больше одного атома на формульную единицу). Однако распределение этих атомов по двум позициям — в одном из M1-октаэдров 6-членного кольца и в одном из

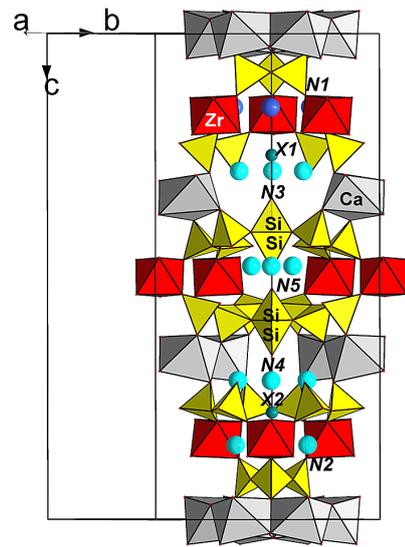


Рис. 1. Общий вид структуры кондерского аквалитоподобного минерала

Fig. 1. A general view of the konder aqualite-like mineral structure

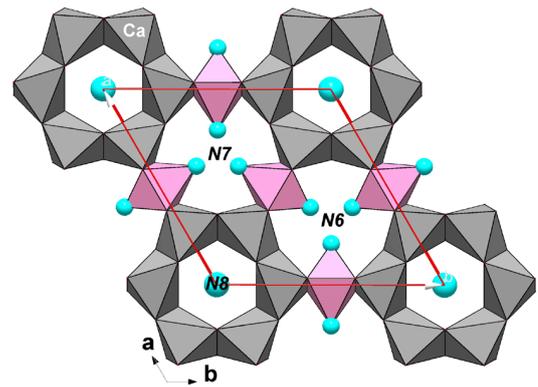


Рис. 2. Структура кондерского аквалитоподобного минерала в проекции на плоскость (001)

Fig. 2. Konder aqualite-like mineral structure in projection on plane (001)

N-полиэдров — приводит к тому, что этот образец не отличается от большинства других, где Sr является примесью в одной из этих позиций или в обеих одновременно. Особенность данного образца в том, что Sr входит в позицию N2, а не в N3 или N4, что не характерно для других эвдиалитов.

Еще одним отличием данного образца является разделение единой позиции в Ca-центрированном M1-октаэдре без существенного дефицита Ca. Этот факт наличия группы R3 у образца со слабой различимостью средних расстояний в M1.1- и M1.2-октаэдрах может свидетельствовать о времени изменения минерала — после окончания кристаллизации или в процессе кристаллизации. Поскольку во всех изученных недекатионированных эвдиалитах с группой R3 эти расстояния существенно различны [4], можно предположить, что разный состав M1-полиэдров формировался уже в процессе кристаллизации этих эвдиалитов. В частности, данный образец мог первоначально

кристаллизоваться в группе $R3m$ и, возможно, длительное время существовать в этой модификации со статистическим распределением Sr, Na и Mn в Са-октаэдрах, а в дальнейшем (при наложении вторичных процессов) понизить свою симметрию не столько за счет перераспределения этих элементов между M1.1- и M1.2-позициями, сколько за счет специфического поведения H_2O — его подвижности со смещением позиций атомов кислорода оксониевых групп с вертикальной плоскости m .

Концентрация Ва в данном образце из Кондерского массива может быть связана с максимумом активности этого элемента на гидротермальной стадии преобразования минерала в этом массиве [2].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Литература

1. Андрианов В. И. AREN-85 — система кристаллографических программ РЕНТГЕН на ЭВМ NORD, SM-4 и EC // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 1. С. 228—232.

2. Моисеев М. М., Чуканов Н. В. Минералогия щелочных пегматитов и гидротермалитов Ковдорского массива // Новые данные о минералах. 2006. Т. 41. С. 56—70.

3. Расцветаева Р. К., Хомяков А. П. Особенности структуры Na, Fe-декационированного эвдиалита с симметрией $R3$ // Кристаллография. 2002. Т. 47. № 2. С. 267—271.

4. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2012. 230 с.

5. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Лисицин Д. В., Воронин М. В., Варламов Д. А. Кристаллическая структура и индикаторное значение одихинчаита из Хибинского массива // Вестник геонаук. 2021. № 4. С. 3—9. DOI: 10.19110/geov.2021.4.1.

6. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В. Еще раз о проблеме оксония в эвдиалитах // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2022). Сыктывкар, 18—20 мая 2022. С. 68—69.

7. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Пеков Н. В., Вигасина М. Ф. Кристаллохимические особенности катионоупорядоченного калиевого аналога аквалита из Ковдорского массива (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2022 (в печати).

8. Хомяков А. П., Нечелюстов Г. Н., Расцветаева Р. К. Аквалит $(H_2O)_8(Na,K,Sr)_5Ca_6Zr_3Si_{26}O_{66}(OH)_9Cl$ — новый минерал группы эвдиалита из щелочного массива Инагли, Саха-Якутия, Россия, и проблема оксония в гидратированных эвдиалитах // ЗРМО. 2007. Т. 136. № 2. С. 39—55.

9. 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. P. 1—16. DOI: 10.1002/jrs.6343.

10. Johnsen, O., Ferraris G., Gault R. A., Grice J. D., Kampf A. R., Pekov I. V. The nomenclature of eudialyte-group minerals // Canad. Mineral. 2003. V. 41. P. 785—794.

11. Petersen O. V., Johnsen O., Gault R. A., Niedermayr G., Grice J. D. Taseqite, a new member of the eudialyte group from the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland // Neues Jahrb. Mineral. Monatsh. 2004. P. 83—96.

12. 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. Vol. 10. Paper No. 587. DOI: 10.3390/min10070587.

13. 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, Vol. 10, P. 720. DOI: 10.3390/min10080720.

14. Rozenberg K. A., Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P. Decationized and hydrated eudialytes. Oxonium problem // Eur. J. Miner. 2005. V. 17. P. 875—882.

References

1. Andrianov V. I. AREN-85 — sistema kristallograficheskikh programm RENTGEN na EVM NORD, SM-4 i EC (AREN-85 — a system of crystallographical programs RENTGEN for EVM NORD, SM-4 and EC). Kristallografiya, 1987, V. 32, No. 1, pp. 228—232.

2. Moiseev M. M., Chukanov N. V. Mineralogiya shchelochnykh pegmatitov i gidrotermalitov Kovdorskogo massiva (Mineralogy of alkaline pegmatites and hydrothermalites of the Kovdor massif). New Data on Minerals, 2006, V. 41, pp. 56—70.

3. Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P. Osobennosti struktury Na, Fe-dekationirovannogo evdialita s simmetriyey $R3$ (Structural characteristics of Na, Fe-decationized eudialyte with the symmetry $R3$). Crystallogr. Rep., 2002, V. 47, No. 2, pp. 232—236.

4. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Aksenov S. M. Mineraly gruppy evdialita: kristallohimiya, svoystva, genezis (Eudialyte-Group Minerals: Crystal Chemistry, Properties, and Genesis). Editorial House of the Nizhny Novgorod State Univ., Nizhny Novgorod, 2012, 230 pp.

5. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Lisitsin D. V., Voronin M. V., Varlamov D. A. Kristallicheskaya struktura i indikatornoye znachenie odikhinchaita iz Khibinskogo massiva (Crystal structure and indicator significance of odikhinchaita from the Khibiny alkaline complex). Vestnik of geosciences, 2021, No. 4, pp. 3—9.

6. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V. Yeshche raz o probleme oksoniya v evdialitakh. Sovremennyye problemy teoreticheskoy, eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii (Yushkinskiye chteniya — 2022) (One more about oxonium problem in eudialytes). Proceedings of conference “Modern problems of the theoretical, experimental and applied mineralogy” (Yushkin Readings — 2022). Syktyvkar, pp. 68—69.

7. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Pekov N. V., Vigasina M. F. Kristallohimicheskiye osobennosti kationo-uporyadochenogo kaliyevogo analoga akvalita iz Kovdorskogo massiva (Kolskiy poluostrov) (Crystal chemical features of cation-ordered potassium analogue of aqualite from the Kovdor massif (Kola peninsula)) Proceedings of RMS, 2022 (in press).

8. Khomyakov A. P., Nечелюстов Г. Н., Rastsvetaeva R. K. Akvalit $(N_3O)_8(Na,K,Sr)_5Ca_6Zr_3Si_{26}O_{66}(OH)_9Sl$ — novyy mineral gruppy evdialita iz shchelochnogo massiva Inagly, Sakha-Yakutiya, Rossiya, i problema oksoniya v gidratirovannykh evdialitakh (Aqualite $(H_2O)_8(Na, K, Sr)_5Ca_6Zr_3Si_{26}O_{66}(OH)_9Cl$, a new mineral of eudialyte-group from the alkaline Inagly massif, Saha-Yakutiya, Russia, and oxonium problem in hydrated eudialytes). Proceedings of RMS, 2007, V. 136, No. 2, pp. 39—55



9. Chukanov N. V., Viggasina 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, pp. 1–16. DOI: 10.1002/jrs.6343.

10. Johnsen, O., Ferraris G., Gault R.A., Grice J. D., Kampf A.R., Pekov I.V. The nomenclature of eudialyte-group minerals. *Canad. Mineral.*, 2003, V. 41, pp. 785–794.

11. Petersen O. V., Johnsen O., Gault R. A., Niedermayr G., Grice J. D. Taseqite, a new member of the eudialyte group from the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*, 2004, pp. 83–96.

12. 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 hyperaluminous conditions. *Minerals*, 2020, V. 10, Paper No. 587. DOI: 10.3390/min10070587.

13. 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, V. 10, pp. 720. DOI: 10.3390/min10080720.

14. Rozenberg K. A., Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P. Decationized and hydrated eudialytes. Oxonium problem. *Eur. J. Miner.*, 2005, V. 17, pp. 875–882.

Received / Поступила в редакцию 27.05.2022