

© Д. чл. И. В. ПЕКОВ,* Е. В. ЛОВСКАЯ,* д. чл. А. Г. ТУРЧКОВА,* Н. В. ЧУКАНОВ,**
А. Е. ЗАДОВ,*** Р. К. РАСЦВЕТАЕВА,**** Н. Н. КОНОНКОВА*****

**ТОМСОНИТ-Sr (Sr, Ca)₂Na[Al₅Si₅O₂₀] · 6—7H₂O — НОВЫЙ ЦЕОЛИТ
ИЗ ХИБИНСКОГО МАССИВА
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) И ИЗОМОРФНАЯ СЕРИЯ
ТОМСОНИТ-Ca—ТОМСОНИТ-Sr¹**

I. V. PEKOV, E. V. LOVSKAYA, A. G. TURCHKOVA, N. V. CHUKANOV, A. E. ZADOV,
R. K. RASTSVETAEVA, N. N. KONONKOVA.

THOMSONITE-Sr (Sr, Ca)₂Na[Al₅Si₅O₂₀] · 6—7H₂O, A NEW ZEOLITE MINERAL
FROM Khibiny MASSIF
(KOLA PENINSULA) AND THOMSONITE-Ca—THOMSONITE-Sr AN ISOMORPHOUS SERIES

* Московский университет, геологический факультет, 119899, Москва, Воробьевы горы
** Институт Проблем химической физики РАН, 142432, Московская обл., п. Черноголовка
*** НПО «Регенератор», 127018, Москва, ул. Складочная, 6, к. 302
**** Институт кристаллографии РАН, 117333, Москва, Ленинский пр-т, 59
***** Институт геохимии и аналитической химии РАН, 117975, Москва, ул. Косыгина, 19

Thomsonite-Sr, a new mineral of the zeolite group, has been found in hydrothermalites of Khibiny alkaline massif, Kola Peninsula, Russia. At Rasvumchorr Mt., it occurs in veinlets cross-cutting natrolite core of ristschorrite pegmatite; it's associated with microcline, aegirine, annite, astrophyllite, magnetite, fluorapatite, pyrophanite, thomsonite-Ca, etc. Thomsonite-Sr occurs as prismatic crystals up to $\times 0.2 \times 0.2$ mm; forms: {100}, {010}, {001}, {110}. At Yuksporn Mt., thomsonite-Sr forms zones up to 0.02 mm in thomsonite-Ca crystals associated with calcite, fluorapophyllite, tobermorite, thaumasit, and barite in veinlet cross-cutting urtite. Transparent, colorless, streak white, luster vitreous. Brittle, cleavage perfect on (100) and good on (010). Mohs' hardness 5. Density meas. — 2.47(2), calc. — 2.62(1) g/cm³. Optically biaxial, positive, $2V = 62(12)^\circ$, α 1.528(2), β 1.532(2), γ 1.540(2); dispersion $r > v$, weak; orientation: $\alpha = a$, $\beta = c$, $\gamma = b$. Mean chemical composition of holotype specimen from Rasvumchorr (electron probe; H₂O determined thermogravimetrically), wt %: Na₂O 3.22, K₂O 0.14, CaO 3.85, SrO 16.27, BaO 0.24, Fe₂O₃ 0.03, Al₂O₃ 27.65, SiO₂ 33.51, H₂O 14.1. Total 99.01. Empirical formula: (Sr_{1.42}Ca_{0.62}Ba_{0.01})_{Σ2.05}(Na_{0.94}K_{0.03})_{Σ0.97}[Si_{5.05}Al_{4.91}O₂₀] · 7.09H₂O. Idealized formula: (Sr, Ca)₂Na[Al₅Si₅O₂₀] · 6—7H₂O, Z = 4. Orthorhombic, space group *Pcnn*. Unit cell parameters: $a = 13.050(2)$, $b = 13.123(2)$, $c = 13.241(2)$ Å, $V = 2268(1)$ Å³. Strongest reflexes of X-ray powder diagram (d , Å— $1/[h^2+k^2+l^2]$): 6.63—7[002], 4.66—8[022, 220], 3.49—9[312, 321], 3.19—8[223, 232, 322], 2.96—10[024, 204, 042], 2.86—10[142, 241, 412], 2.69—10[242], 2.186—7[244, 060, 600]. IR spectrum is given. A new series of the zeolite group — thomsonite series, is distinguished after the discovery of thomsonite-Sr; «usual» thomsonite with Ca > Sr is renamed to thomsonite-Ca. Continuous isomorphous series thomsonite-Ca — thomsonite-Sr, from Ca₂Na[Al₅Si₅O₂₀] · 6H₂O to (Sr_{1.69}Ca_{0.49}Ba_{0.03})_{Σ2.21}(Na_{0.93}K_{0.02})_{Σ0.95}[Si_{5.02}Al_{4.84}O₂₀] · n H₂O, is established in the nature. Crystal structure of high-strontian thomsonite is studied; $R = 0.039$. Large ion Sr²⁺ is localized in independent site in the center of isolated volume of framework, unlike Ca²⁺ is displaced from the center. Type specimen of thomsonite-Sr is deposited in Fersman Mineralogical Museum, Moscow.

Томсонит Ca₂Na[Al₅Si₅O₂₀] · 6H₂O относится к числу достаточно широко распространенных в природе цеолитов. Он встречается в гидротермалитах, связанных с многими типами пород. Алюмокремнекислородный каркас томсонита характеризуется высокой степенью упорядоченности Si- и Al-тетраэдров (коэффициент разупорядоченности обычно не превышает 5—10 % — Alberti e. a., 1981), а все шесть молекул воды входят в ближайшее координационное окружение внекаркасных катионов (Stahl e. a., 1990). Следствием этого является устойчивая в отличие от многих других цеолитов стехиометрия: составы большинства образцов томсонита достаточно близки к идеальному. Единственным примесным катионом, входящим в этот минерал в существенных количествах, является стронций, для которого прослеживается четкая обратная корреляция с кальцием, а содержания К, Ва, Mg, Fe —

¹ Новый минерал томсонит-Sr и его название одобрены Комиссией по новым минералам и названиям минералов ВМО и утверждены Комиссией по новым минералам и названиям минералов ММА 5 сентября 2000 г.

обычных компонентов многих других цеолитов — в томсоните, как правило, незначительны (Hey, 1932; Gottardi, Galli, 1985; Ross e. a., 1992).

Стронцийсодержащий томсонит описывался в литературе неоднократно. Так, в минерале из Россберга близ Дармштадта, Германия, зафиксировано 2.47 % SrO (Mueller, Deisinger, 1971); томсонит из Долины Смерти в Калифорнии (США) содержит 2.87 % SrO (Alberti e. a., 1981), а минерал из Йеллоу Лейк в Британской Колумбии, Канада, — 6.52 % SrO (Wise, Tschernich, 1978). Эти образцы происходят из полостей в эффузивных породах — базальтоидах и трахитах. Наиболее высокие содержания стронция отмечались в томсоните из гидротермалитов щелочных интрузивных комплексов. В минерале из пегматитов массива Инагли, Южная Якутия, обнаружено 5.92 % SrO, а по данным неполных анализов для других инаглинских образцов, приводится цифра 8.8 % (Ефимов и др., 1963). «Рекордсменом» по количеству стронция до сих пор оставался томсонит из целестино-томсонитовых прожилков, секущих нефелиновые сиениты массива Фадью-Куда, расположенного в бассейне одноименной реки в центральной части полуострова Таймыр. Этот минерал содержит 9.72 % SrO, и атомное отношение Sr/Ca в нем составляет 0.89 (Ефимов и др., 1966).

Стронций, как показывают наши исследования, весьма характерен и для томсонита Хибино-Ловозерского щелочного комплекса на Кольском полуострове. В Хибинах этот минерал наиболее распространен в специфических обогащенных кальцием низкотемпературных гидротермальных прожилках, секущих породы ийолитуртитового комплекса. Встречается томсонит и в составе поздних ассоциаций в полостях щелочных пегматитов Хибинского и Ловозерского массивов.

Стронций-доминантный томсонит найден нами в Хибинах. Он получил название **томсонит-Sr** в соответствии с действующей Номенклатурой группы цеолитов (Recommended., 1997). Правилами Номенклатуры предусмотрено, что если цеолиты имеют одинаковый тетраэдрический каркас, но различаются по составу внекаркасных катионов, то они должны носить единое корневое название — название серии, а названия минеральных видов внутри серий формируются с помощью суффиксов-уточнителей, указывающих на преобладающий внекаркасный катион (Recommended., 1997). Таким образом, в свете открытия томсонита-Sr «обычный» томсонит с $Ca > Sr$ должен быть переименован в томсонит-Ca. Корневое название «томсонит» при этом переходит в разряд надвидовых (подобно тому как это произошло с терминами «шабазит», «гейландит» и др.), и в группе цеолитов выделяется новая серия — серия томсонита, представленная томсонитом-Ca и томсонитом-Sr. В табл. 1 дан химический состав минералов серии томсонита, а рис. 1 демонстрирует непрерывность ряда томсонит-Ca—томсонит-Sr.

Томсонит-Sr установлен в двух точках Хибинского массива. Основное исследование нового минерала выполнено на материале из пегматитового тела, расположенного на северном отроге горы Расвумчорр, примыкающем к перевалу Юкспорлак. Пегматит, изученный в основном по элювиальному глыбовому развалу, некогда представлял собой линзу, залегающую в ризчорритах. В пегматитовом теле выделяются две зоны — нефелино-микроклиновая оторочка мощностью до 10—15 см и существенно натролитовое ядро. В состав оторочки помимо микроклина и красного шпрудштейнизированного нефелина входят эгирин, аннит, астрофиллит и титанит. Здесь развиты многочисленные прожилки натролита, наблюдается вкрапленность эшинита-(Ce), а некоторые участки обогащены магнетитом и гематитом. Ядро в основном сложено шестоватым белым до серого натролитом и содержит много мелких каверн. В массивный натролит вырастают кристаллы аннита, титанита, лейкофана, флюорита, астрофиллита, лоренценита, щербаковита, фторалпатита, генримейерита, сферолиты пиррофанита и эшинита-(Ce). В полостях найдены кафетит, астрофиллит, лоренценит и некоторые другие минералы. Агрегаты грубошестоватого натролита рассечены более поздними цеолитовыми прожилками, в составе которых установлены натролит второй генерации, шабазит-Ca, шабазит-K, томсонит-Ca и томсонит-Sr. Минералы серии томсонита вместе с поздним натролитом образуют извилистые прожилки мощ-

Таблица 1

Химический состав (мас. %) минералов серии томсонит-Са—томсонит-Sr
 Chemical composition (wt %) of minerals of the thomsonite-Ca—thomsonite-Sr series

Компо- нент	Анализ																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Na ₂ O	3.95	3.82	3.86	5.86	3.02	3.68	3.49	3.65	3.47	3.55	3.64	3.53	3.60	3.25	3.27	3.17	3.22(±0.09)
K ₂ O	0.08	0.00	0.00	0.56	2.16	0.06	0.26	0.00	0.05	0.00	0.03	0.02	0.04	0.10	0.10	0.11	0.14(±0.05)
CaO	12.13	11.85	9.60	4.45	5.92	7.35	7.45	12.92	9.60	10.78	7.57	6.52	5.56	6.73	3.66	3.04	3.85(±0.44)
SrO	2.47	2.87	6.52	5.76	9.72	10.54	9.58	1.58	7.75	5.85	10.90	13.54	15.12	12.74	18.39	19.36	16.27(±1.10)
BaO	0.18	0.03	Н. о.	0.16	0.15	0.07	0.80	0.51	0.00	0.08	0.39	0.20	0.07	0.15	0.40	0.51	0.24(±0.12)
MgO	0.16	0.00	» »	3.05	1.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.08	0.00	» »	0.22	0.05	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04	0.03	0.03(±0.03)
Al ₂ O ₃	30.64	29.36	30.67	26.38	29.27	29.68	27.52	29.82	29.70	31.42	29.11	28.77	28.22	29.36	27.61	27.25	27.65(±0.45)
SiO ₂	38.21	36.75	35.55	44.05	36.68	37.47	36.06	37.26	36.21	36.26	35.16	34.51	34.78	33.62	33.48	33.30	33.51(±0.60)
H ₂ O ⁺	12.62	15.32	Н. о.	9.25	11.67	Н. о.	13.4*	Н. о.	Н. о.	Н. о.	14.1						
Сумма	100.62	100.00	86.20	100.20	100.26	88.85	86.14	85.74	86.78	87.94	86.80	87.09	100.79	86.01	86.95	86.77	99.01
Формульные коэффициенты, расчет на 20 атомов кислорода																	
Na	1.04	1.03	1.05	1.48	0.82	0.98	0.97	0.97	0.94	0.94	1.01	0.99	1.01	0.92	0.95	0.93	0.94
K	0.01	—	—	0.09	0.38	0.00	0.05	—	0.01	—	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Ca	1.74	1.77	1.44	0.62	0.89	1.09	1.15	1.90	1.44	1.57	1.16	1.01	0.87	1.05	0.59	0.49	0.62
Sr	0.19	0.23	0.53	0.43	0.79	0.84	0.80	0.13	0.63	0.46	0.90	1.14	1.27	1.08	1.59	1.69	1.42
Ba	0.01	0.00	Н. о.	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	—	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.03	0.01
Mg	0.05	—	Н. о.	0.59	0.21	—	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe	0.00	—	Н. о.	0.02	0.00	—	0.10	—	—	—	—	—	—	0.01	0.00	0.00	0.00
Al	4.84	4.82	5.05	4.04	4.83	4.83	4.66	4.82	4.89	5.06	4.90	4.91	4.83	5.05	4.86	4.84	4.91
Si	5.12	5.12	4.97	5.73	5.13	5.17	5.18	5.11	5.06	4.95	5.03	4.99	5.05	4.91	5.00	5.02	5.05
H ₂ O	5.72	7.13	Н. о.	4.02	5.46	Н. о.	6.47	Н. о.	Н. о.	Н. о.	7.09						

Примечание. Ан. 1—11 — томсонит-Са, ан. 12—17 — томсонит-Sr; ан. 1—5 — литературные данные: ан. 1 — Россберг, Германия, в сумму анализа входят также (мас. %): CuO 0.05, TiO₂ 0.05 (Mueller, Deisenger, 1971); ан. 2 — Долина Смерти, Калифорния, США (Alberti e. a., 1981); ан. 3 — Йеллоу Лейк, Канада (Wise, Tschernich, 1978); ан. 4 — массив Инагли, Южная Якутия, в сумму анализа входят также (мас. %): MnO 0.06, H₂O⁻ 0.40 (Ефимов и др., 1963); ан. 5 — массив Фадью-Куда, Центральный Таймыр, в сумму анализа входит также H₂O⁻ 0.52 мас. % (Ефимов и др., 1966). Ан. 6—17 — наши данные: ан. 6 — натролитовая жила в долине р. Суллуй, Ловозерский массив; ан. 7—17 — Хибинский массив: ан. 7 — пегматит, г. Эвеслогчорр; ан. 8—13 — кальцит-цеолитовые гидротермалиты: ан. 8 — г. Расвумчорр; ан. 9 — г. Кукисвумчорр, ан. 10—13 — г. Юкспор; ан. 14—17 — пегматит, г. Расвумчорр (ан. 17 — средние величины и их разброс по 10 точкам для голотипного образца. * — ан. 13 отвечает высокостроениевой зоне концентрически-зонального кристалла, а содержание воды определено для всего образца.

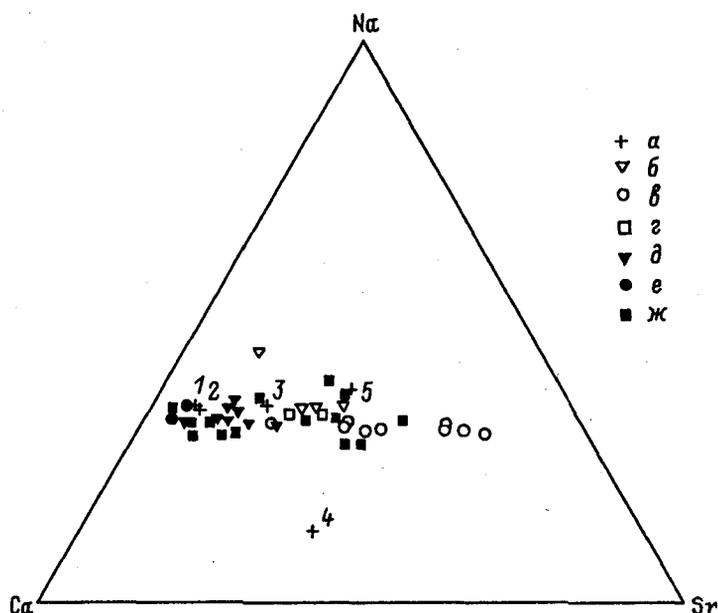


Рис. 1. Соотношения внекаркасных катионов в минералах серии томсонита.

a — литературные данные: 1 — Россберг, Германия (Mueller, Deisenger, 1971); 2 — Долина Смерти, Калифорния, США (Alberti e. a., 1981); 3 — Йеллоу Лейк, Британская Колумбия, Канада (Wise, Tschernich, 1978); 4 — Инагли, Южная Якутия (Ефимов и др., 1963); 5 — Фадью-Кула, Центральный Таймыр (Ефимов и др., 1966); б—ж — наши данные: б — натролитовая жила, долина р. Сулуй, Ловозерский массив; в—ж — Хибинский массив: в — пегматит, гора Расвумчорр; г — пегматит, гора Эвслогчорр; д—ж — кальцито-цеолитовые гидротермалиты: д — гора Расвумчорр, е—з — гора Юкспор, ж — гора Кукисвумчорр.

Fig. 1. Ratios of extraframework cations in the thomsonite series minerals.

ностью до 2 мм, иногда трассирующие линию контакта магнетитсодержащей полевошпатовой зоны пегматита с участками сплошного натролита. Эти прожилки относятся к классическим параллельно-шестоватым агрегатам 1-го рода, по Д. П. Григорьеву: рост кристаллов цеолитов начинался от обеих стенок, и в осевой зоне прожилка две растущие навстречу друг другу щетки смыкаются. В раздувах прожилков (до 5 мм) нередки открытые щелевидные полости, инкрустированные корочками томсонита. Брусковидные кристаллы этого минерала здесь достигают в длину 1 мм при толщине до 0.2 мм. Интересно, что каждый кристалл томсонита эпитаксически нарастает на более ранний игольчатый кристалл натролита (направления [001] обоих кристаллов совпадают), т. е. томсонитовая щетка оказывается продолжением натролитовой. Такая эпитаксия, очевидно, обусловлена определенным сходством в строении SiAlO-каркаса этих цеолитов. Распределение Ca и Sr в томсоните не закономерно, попадаются участки прожилков, сложенные только томсонитом-Sr или же только томсонитом-Ca. Основания кристаллов томсонита, как правило, более обогащены стронцием, чем головки, но встречаются и однородные по составу индивиды.

Другая находка томсонита-Sr в иной минеральной ассоциации сделана в южной части горы Юкспор, в материале из подземных выработок. Здесь новый минерал находится в полостях гидротермального прожилка мощностью до 1.5—2 см, секущего обогащенный пироксеном уртит. Зальбанды прожилка мощностью до 1—1.5 мм сложены тонкошестоватым агрегатом томсонита-Ca и тоберморита, главный минерал осевой зоны — крупнозернистый кальцит. Стенки небольших полостей инкрустированы кристаллами кальцита, томсонита, фторапофиллита и голубого Sr-содержащего барита, пучками волосовидных и игольчатых индивидов таумасита и тоберморита. Многие каверны нацело заполнены агрегатами этих минералов. Кристаллы томсонита, достигающие $3 \times 1 \times 0.5$ мм, обладают концентрической зональностью: в них ритмично чередуются до шести зон мощностью от первых мик-



Рис. 2. Концентрически-зональные кристаллы томсонита с горы Юкспор, Хибинны.

Темные зоны — низкостронциевый томсонит-Са, светлые — томсонит-Sr и высокостронциевые разновидности томсонита-Са (поперечное сечение; изображение получено в обратно-рассеянных электронах).

Fig. 2. Concentrically zoned crystals of thomsonite from Yukspor Mt., Khibiny massif. (Cross-section, back-scattered electron images).

рометров до 0.02 мм, имеющих между собой резкие границы, что хорошо видно на срезе под электронным микроскопом при наблюдении в обратно-рассеянных электронах (рис. 2). Различаются эти зоны величиной Са/Sr отношения: одни из них отвечают томсониту-Sr, другие практически не содержат стронция, некоторые имеют промежуточный, иногда пограничный состав.

Кристаллы изученных минералов серии томсонит-Са—томсонит-Sr призматические, от укороченных, изометричных, до почти игольчатых. Иногда они незначительно уплощены по [010]. Кристаллы с горы Юкспор измерены на двукружном гониометре ГД-1. Их главными габитусными формами являются пинакоиды {010}, {001} и ромбическая призма {110}, нередко присутствуют грани пинакоида {100}, а на головках некоторых кристаллов наблюдаются грани ромбических призм {101}, {011} и ромбической дипирамиды {111} (рис. 3, а; 4, а, б). Сферические координаты граней призм следующие (в скобках даны вычисленные значения): {110} — $\rho = 90^\circ$, $\phi = 44.6^\circ$ ($45^\circ 10'$); {011} — $\rho = 46.3^\circ$ ($45^\circ 16'$), $\phi = 0$. Слаборазвитые грани {101} и {111} проиндексированы методом развития зон. Грани {110} часто покрыты грубой продольной штриховкой. Нередки параллельные сростки по (010) двух или нескольких кристаллов. Огранка кристаллов томсонита-Sr с горы Расвумчорр более простая: они брусковидные, имеют квадратное поперечное сечение за счет одинакового развития граней пинакоидов {100} и {010}, а грани {110} присутствуют лишь в виде узкого пояса. Головки их плоские, образованы только гранью пинакоида {001} (рис. 3, б; 4, в).

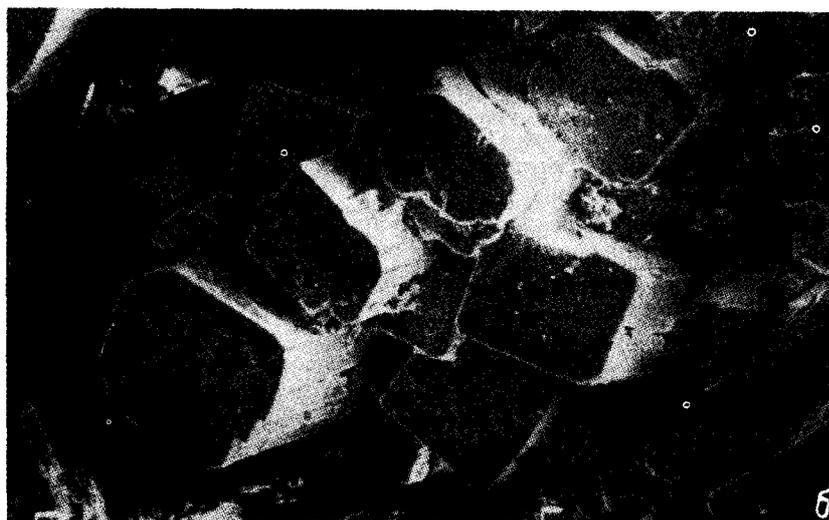
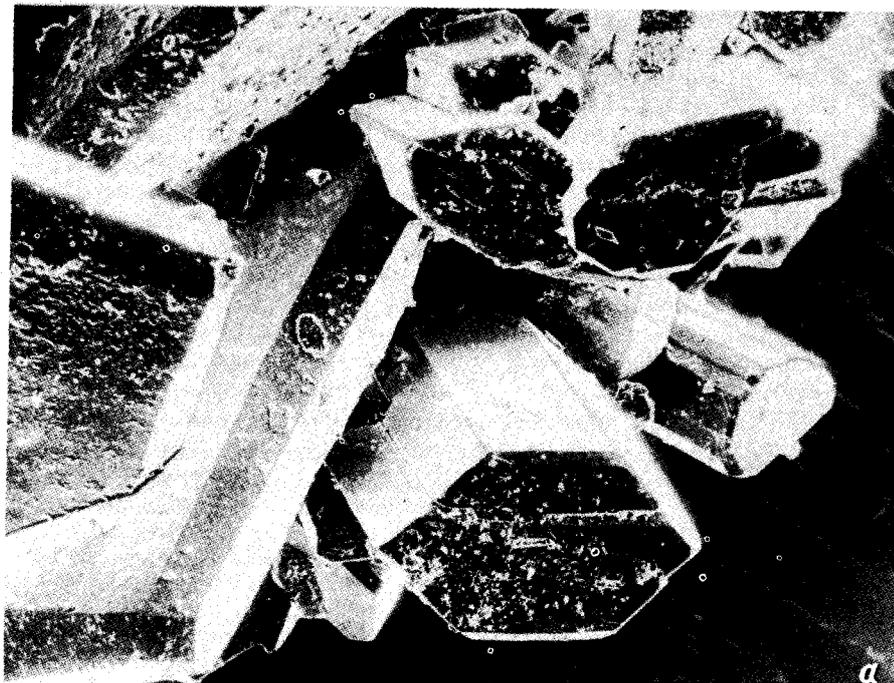


Рис. 3. Минералы серии томсонита из Хибин, РЭМ-фото.

a — призматические кристаллы, сложенные зонами томсонита-Са и томсонита-Sr (см. рис. 2), с таблитчатыми кристаллами фторапофиллита, гора Юкспор; увел. 50, *б* — кристаллы томсонита-Sr, г. Расвумчорр; увел. 100.

Fig. 3. SEM-photomicrographs of the thomsonite series minerals from Khibiny massif.

Томсонит-Sr бесцветный, водяно-прозрачный, со стекляннм блеском и белой чертой, в ультрафиолетовых лучах не люминесцирует. Минерал хрупкий, наблюдается совершенная спайность по (100) и средняя по (010), излом неровный поперек удлинения кристалла и ступенчатый вдоль направлений спайности. Твердость по Моосу 5. Плотность, измеренная методом уравнивания зерна в тяжелых жидкостях, 2.47(2), рентгеновская — 2.62(1), вычисленная по соотношению Гладстона—Дейла — 2.50(1) гсм³. Томсонит-Sr оптически двуосный, положительный,

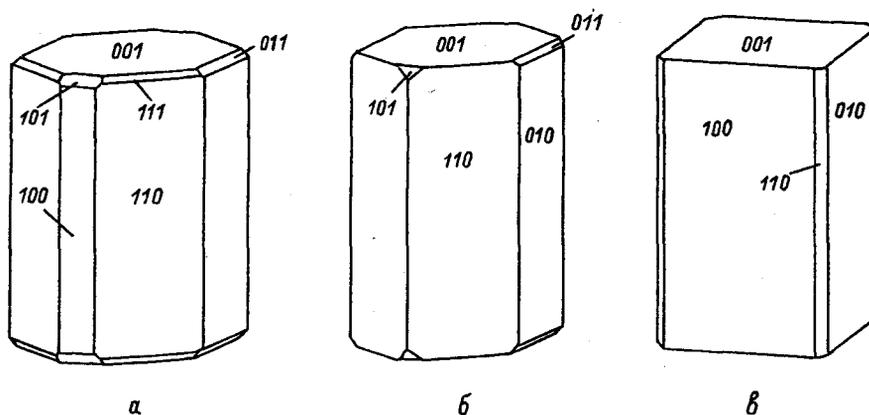


Рис. 4. Морфология кристаллов томсонита из Хибин.

a—*b* — зональные кристаллы, гора Юкспор (см. рис. 3, *a*); *v* — кристалл томсонита-Sr, гора Расвумчорр (см. рис. 3, *b*).

Fig. 4. Morphology of the thomsonite crystals (see fig. 3).

$2V_{изм} = 62(12)$, $2V_{выч} = 71(5)$. Показатели преломления: $n_p = 1.528(2)$, $n_m = 1.532(2)$, $n_g = 1.540(2)$. Бесцветный, не плеохроирует. Дисперсия оптических осей слабая, $r > v$. Оптическая ориентировка: $n_p = a$, $n_m = c$, $n_g = b$.

Катионный состав минералов серии томсонит-Са—томсонит-Sr изучен электронно-зондовым методом, содержание воды определено из микронавесок по потере массы при прокаливании. Результаты приведены в табл. 1. Основные особенности химического состава минералов серии томсонита из Хибино-Ловозерского комплекса следующие:

1) соотношение Si и Al очень устойчиво, величина Si/Al отклоняется от единицы лишь незначительно;

2) отношение Na % (Ca + Sr) ≈ 0.5 также колеблется мало, что диктуется стабильностью отрицательного заряда AlSiO-каркаса (≈ -5 и не связано с величиной Ca/Sr отношения;

3) содержания Ca и Sr находятся в строгой обратной зависимости; Ca/Sr отношение варьирует в очень широких пределах: содержание стронция колеблется от десятых долей процента до 19.4 % SrO (Sr/Ca = 0.0—3.45), существенных разрывов в этом ряду не наблюдается — рис. 1;

4) примеси других катионов (K, Ba, Mg, Fe) незначительны;

5) содержание воды, судя по прямым определениям и по дефициту суммы электронно-зондовых анализов, колеблется в пределах 6-7 молекул H₂O на формулу при Z=4, т. е. для (Si, Al)₁₀O₂₀.

Эмпирическая формула томсонита-Sr, рассчитанная на O₂₀ для среднего состава голотипного образца с горы Расвумчорр (ан. 17 в табл. 1), следующая: (Sr_{1.42}Ca_{0.62}Ba_{0.01})_{Σ2.05}(Na_{0.94}K_{0.03})_{Σ0.97}[Si_{5.05}Al_{4.91}O₂₀] · 7.09H₂O. Эмпирическая формула томсонита-Sr с горы Юкспор такова: (Sr_{1.27}Ca_{0.87})_{Σ2.14}(Na_{1.01}K_{0.01})_{Σ1.02}[Si_{5.05}Al_{4.83}O₂₀] · 6.47H₂O. Идеализированная формула нового минерала: (Sr, Ca)₂Na[Al₅Si₅O₂₀] · 6—7H₂O, Z=4.

Кристаллическая структура высокостронциевого томсонита изучена на монокристалле с горы Расвумчорр. R = 0.039. Симметрия ромбическая, пространственная группа Pcn. Параметры элементарной ячейки: a = 13.050(2), b = 13.123(2), c = 13.241(2) Å, V = 2268(1) Å³. В целом наш минерал близок к ранее исследованным образцам томсонита (Alberti e. a., 1981; Stahl e. a., 1990), однако структуры томсонита-Sr и томсонита-Са неидентичны: вхождение крупного иона Sr²⁺ в значительных количествах приводит к появлению определенных различий.

Атомы Si и Al в каркасе изученного минерала практически полностью упорядочены. Внекаркасные катионы, как и в ранее изучавшемся томсоните-Са, локализованы в полостях двух разных типов — в каналах, вытянутых вдоль [001], и в

изолированных «фонарях». В структуре бесстронциевого или низкостронциевого томсонита-Са заполнение 8-кратной катионной позиции в каналах смешанное — ее занимают Na и Ca в соотношении 1 : 1, а единая 4-кратная позиция внутри «фонарей» расщеплена на две отстоящие друг от друга на 0.8 Å 8-кратные подпозиции (они связаны между собой центром инверсии, находящимся в центре «фонаря»), заселенные статистически (Alberti e. a., 1981; Syahl e. a., 1990). Расщепление позиции здесь связано с объемом «фонаря», который велик для того, чтобы ион Ca²⁺ находился в его центре. Таким образом, кристаллохимическая формула томсонита-(Са), отражающая реальное распределение внекаркасных катионов, должна записываться таким образом: (NaCa)Ca[Al₅Si₅O₂₀] · 6H₂O. Sr²⁺ в структуре изученной высокостронциевой разновидности томсонита-Са локализуется только в позиции внутри «фонаря», замещающая там Ca²⁺. При этом крупный ион стронция в отличие от кальция размещается непосредственно в центре полости. Если количество стронция недостаточно для полного заселения позиции внутри «фонаря», то она оказывается расщепленной на три подпозиции, занятые статистически: 4-кратная в центре заполняется ионами Sr²⁺, две смещенные 8-кратные — ионами Ca²⁺. Исходя из этих данных в томсоните-Sr с наиболее высоким Sr/Ca отношением позиция в центре «фонаря» должна полностью заселиться стронцием (таким образом, она становится единой 4-кратной), а избыток Sr²⁺ будет вынужден размещаться в позиции внутри каналов вместе с Na и Ca. Кристаллохимическая формула томсонита-Sr может быть записана так: (Na, Ca, Sr)₂Sr[Al₅Si₅O₂₀] · 6—7H₂O.

Интересно, что томсонит-Sr с составом, приближающимся к конечному члену Sr₂Na[Al₅Si₅O₂₀] · nH₂O, не обнаружен: наша самая высокостронциевая точка отвечает формуле (Sr_{1.69}Ca_{0.49}Ba_{0.03})Σ2.21(Na_{0.93}K_{0.02})Σ0.95[Si_{5.02}Al_{4.84}O₂₀] · nH₂O (ан. 16 в табл. 1). Возможно, конечный стронциевый член серии еще будет найден в природе или синтезирован, но не исключено и то, что реализация такого соединения в принципе маловероятна. Для того чтобы его получить, необходимо ввести в (NaCa)-позицию внутри каналов большое количество Sr, эквивалентное количеству Na. Разница в размере между Na⁺ и Sr²⁺ весьма велика, и Ca²⁺, видимо, выполняет в этой позиции структуры томсонита-Sr «посредническую» функцию. Отсутствие этого «посредника» как раз и может сыграть роль «структурного ограничителя», мешающего реализации конечного стронциевого члена серии томсонита.

Порошковая рентгенограмма томсонита-Sr приведена в табл. 2. Она отличается от порошкограммы томсонита-Са лишь незначительно увеличенными значениями межплоскостных расстояний. Такие небольшие масштабы изменений, кажущиеся на первый взгляд странными при замене иона Ca²⁺ существенно более крупным Sr²⁺, связаны с тем, что AlSiO-каркас при этом почти не деформируется: размеры «фонаря», принимающего основную часть стронция, остаются практически неизменными. ИК-спектр нового минерала также очень близок к спектру кальциевого члена серии.

Появление томсонита-Sr в гидротермалитах Хибин представляется вполне закономерным. Содержание стронция в породах массива составляет приблизительно 0.11 % (Кухаренко и др., 1968), более чем втрое превышая кларковое. В Хибинах на сегодняшний день известно уже 18 собственных минералов этого элемента. В целом геохимическая история стронция в Хибино-Ловозерском комплексе, как и в большинстве других геологических объектов, тесно связана с кальцием. Даже в поздних образованиях, где наблюдается наибольшее разнообразие собственных стронциевых минералов, значительное количество этого элемента все равно находится в рассеянном виде в качестве примеси в минералах кальция, главным образом в апатите. В позднегидротермальных образованиях Хибинского и Ловозерского массивов одними из концентраторов стронция оказываются кальциевые цеолиты. Однако минералообразующая среда здесь, видимо, настолько обогащена стронцием, что подчас он из примесного катиона в них превращается в видообразующий: так, недавно нами в гидротермалитах Ловозера описан новый минеральный вид — шабазит-Sr (Пеков и др., 2000), сделана вторая в мире находка гейландита-Sr. Как и

Результаты расчета рентгенограммы томсонита-Sr, гора Расвумчорр
X-ray powder pattern of thomsonite-Sr from Rasvumchorr Mt

<i>I</i>	<i>d</i> _{изм} Å	<i>d</i> _{выч} Å	<i>hkl</i>	<i>I</i>	<i>d</i> _{изм} Å	<i>d</i> _{выч} Å	<i>hkl</i>
7	6.63	6.62	002	1	1.967	1.962	425
6	5.93	5.91	012	1	1.894	1.896	444
8	4.66	4.660	022	4	1.828	1.828	406
		4.627	220	0.5	1.769	1.778	712
2	4.37	4.381	212			1.763	246
		4.368	221	2	1.719	1.717	703
3	4.15	4.133	301			1.686	436
9	3.49	3.504	312	1	1.680	1.680	463
		3.497	321			1.679	634
		3.194	223	4	1.617	1.615	181
8	3.19	3.185	232	1	1.570	1.573	536
		3.180	322			1.569	635
		2.955	024	1	1.539	1.542	660
10	2.960	2.952	204			1.540	822
		2.940	042	1	1.504	1.508	626
		2.868	142			1.500	456
10	2.860	2.862	241			1.470	084
		2.856	412	5	1.465	1.468	148
10	2.691	2.680	242			1.466	480
5	2.586	2.595	105			1.463	804
		2.581	143	1	1.439	1.441	248
2.5	2.439	2.440	052			1.440	428
		2.432	432	1	1.426	1.428	824
6	2.258	2.253	343			1.426	842
		2.195	244			1.394	309
7	2.186	2.187	060	1	1.394	1.393	384
		2.175	600			1.391	292
1	2.063	2.065	620, 216				

Примечание. Условия съемки УРС-556 камера РКД 57.3, Fe-антикатод. При индентификации рефлексов учитывались данные по интенсивностям, полученные при изучении кристаллической структуры высокостроичного томсонита.

томсонит-Sr, эти минералы в Хибино-Ловозерском комплексе образуют непрерывные ряды со своими кальциевыми аналогами. Стронций может иметь в ряде случаев даже преимущество перед кальцием: крупный ион Sr²⁺ лучше фиксируется в обширных полостях каркаса некоторых цеолитов. Как свидетельствуют наши данные, основанные на изучении химического состава цеолитов Хибино-Ловозерского комплекса (Турчкова и др., 2000), каждый из этих минералов, вопреки распространенным представлениям, характеризуется вполне устойчивыми «индивидуальными предпочтениями» в отношении внекаркасных катионов, причем не только главных, но и примесных. Особенно четко тенденции к накоплению определенными минералами определенных компонентов становятся видны при исследовании парагенезисов цеолитов. На основании этих данных нами были построены ряды последовательного изменения степени сродства цеолитов к щелочным и щелочноземельным катионам. Так, кальций и особенно стронций предпочитают концентрироваться в следующих минералах (расположены по убыванию степени сродства): томсонит → гейландит → шабазит → гмелинит → филлипсит. Несомненно, такие эмпирически выявленные закономерности имеют свои кристаллохимические предпосылки, что и было показано выше на примере структуры томсонита, где обнаружена позиция, наиболее приспособленная для вхождения иона Sr²⁺. Очевидно, этим и объясняется наблюда-

мая тенденция к преимущественному в сравнении с другими цеолитами накоплению стронция именно в томсоните. Таким образом, благоприятное сочетание химизма среды (обогатенность стронцием) и особенностей кристаллической структуры минерала создало условия для возникновения в гидротермалитах Хибинского массива томсонита-Sr и реализации изоморфной серии томсонит-Ca—томсонит-Sr. Находка на горе Юкспор цеолитов серии томсонита в парагенезисе с низкоалюминиевым калийсодержащим тоберморитом позволяет оценивать температуру их формирования в 130—150 °С.

Эталонный образец томсонита-Sr передан в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве, рег. № 2605/1.

Авторы благодарны Л. А. Паутову за помощь. Работа выполнена при поддержке гранта ведущей научной школы № 00-15-98-497.

Список литературы

- Ефимов А. Ф., Ганзеев А. А., Катаева З. Т. О находках стронциевого томсонита в СССР // Докл. АН СССР. 1966. Т. 169. № 5. С. 1153—1155.
- Ефимов А. Ф., Кравченко С. М., Власова Е. В. К минералогии щелочных пегматитов Инаглинского массива // Тр. ИМГРЭ. 1963. В. 16. С. 141—175.
- Кухаренко А. А., Ильинский Г. А., Иванова Т. Н. и др. Кларки Хибинского щелочного массива // ЗВМО. 1968. № 2. С. 133—149.
- Пеков И. В., Турчкова А. Г., Чуканов Н. В. и др. Шабазит-Sr (Sr, Ca)[Al₂Si₄O₁₂] · 6H₂O — новый цеолит из Ловозерского массива, Кольский полуостров // ЗВМО. 2000. № 4. С. 54—58.
- Турчкова А. Г., Ловская Е. В., Пеков И. В. и др. Распределение щелочных и щелочноземельных катионов в цеолитах Хибино-Ловозерского комплекса (Кольский полуостров) // Тез. докл. Материалы XIX Всероссийского семинара «Геохимия магматических пород». М., 2000. С. 146—148.
- Alberti A., Vezzalini G., Tazzoli V. Thomsonite: a detailed refinement with cross checking by crystal energy calculations // Zeolites. 1981. Vol. 1. P. 91—97.
- Gottardi G., Galli E. Natural zeolites. Berlin. 1985. 409 p.
- Hey M. H. Studies of the zeolites. Part II. Thomsonite (including faroelite) and gonnardite // Miner. Mag. 1932. Vol. 23. P. 51—125.
- Mueller U., Deisinger H. Strontium—Thomsonit aus dem Rossbergbasalt von Rossdorf bei Darmstadt // Aufschluss. 1971. Vol. 22. P. 145—148.
- Recommended nomenclature for zeolite minerals: report of the Subcommittee on Zeolites of the IMA, Commission on New Minerals and Mineral Names // Canad. Miner. 1997. Vol. 35. P. 1571—1606.
- Ross M., Flohr M. J. K., Ross D. R. Crystalline solution series and order—disorder within the natrolite mineral group // Amer. Miner. 1992. Vol. 77. P. 685—703.
- Stahl K., Kvik A., Smith J. V. Thomsonite, a neutron diffraction study at 13 K // Acta Cryst. 1990. C46. P. 1370—1373.
- Wise W. S., Tschernich R. W. Habits, crystal forms and composition of thomsonite // Canad. Miner. 1978. Vol. 16. P. 487—493.

Поступила в редакцию
14 ноября 2000 г.