

И. В. ГИНЗБУРГ, Е. И. СЕМЕНОВ, Л. Л. ЛЕОНОВА,  
Г. А. СИДОРЕНКО, В. Д. ДУСМАТОВ

### БОГАТЫЙ ЩЕЛОЧАМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ЭКАНИТ СРЕДНЕЙ АЗИИ

Силикат щелочей, кальция и тория изучен нами из щелочных метасоматитов Средней Азии. Единственным минералом, с которым он сходен по ряду свойств, оказался цейлонский эканит (Anderson а. о., 1964; Gubelin, 1961). Однако эканиты Средней Азии и Цейлона различны. Среднеазиатский эканит, вероятно, представляет собою разновидность этого минерала.

На Цейлоне эканит обнаружен недавно среди подготовленных к оправе драгоценных камней одного из россыпных месторождений. В Средней Азии акцессорная эканитовая минерализация в коренном залегании выявлена пока в трех (А, В, В) различных районах развития нефелиновых и щелочных сиенитов. Соответственно для каждого из этих районов эталонами послужили образцы эканита из следующих пород: А — кварц-альбит-микроклин-эгириновой «жилы», В — «дайки» кварцевого сиенита и В — «жилы» кварц-альбит-микроклин-кальцитовых пород.

Авторы глубоко признательны Б. И. Омеляненко и М. О. Сулейманову за предоставление эканита и за сообщения некоторых сведений о нем. Свою искреннюю благодарность авторы приносят участникам изучения эканита: химикам Т. А. Буровой, М. Е. Казаковой, Г. М. Варшал, а также всем другим лицам, фамилии которых указаны в тексте.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКАНИТА

Эканит образует хорошо ограненные изредка двусторонние кристаллы, реже неправильные зерна. Те и другие варьируют по величине от 0,1 до 10 мм в длину, достигая иногда 5 см и более. Длина кристаллов обычно в 1,5—3 раза больше их ширины. Грани кристаллов — блестящие, независимо от степени их прозрачности; блеск свежего излома стеклянный, у прозрачных разновидностей он все более тусклый, с уменьшением прозрачности минерала; непрозрачные разновидности на изломе матовые.

Окраска эканита — зеленая разной интенсивности, часто с желтым оттенком. Окраска, блеск и прозрачность различны у эканита отдельных мест его нахождения. Эканит В желто-зеленый, матовый, непрозрачный, без признаков изменения этих свойств у отдельных зерен и в их пределах. Эканит В, напротив, наиболее неоднородный в пределах зерен, и в связи с этим, различен на отдельных участках месторождения. Здесь встречаются трехзональные зерна эканита: в ядре — ярко-зеленые, блестящие,

прозрачные, в промежутке — зеленые, полупрозрачные, и по периферии — желто-зеленые, матовые, непрозрачные.

Эканит *A* по перечисленным признакам похож на эканит *B*, но прозрачные ядра у него не обнаружены. У обоих эканитов непостоянно развита краевая осветленная зона — сплошная и прерывистая, наиболее широкая с одной из узких сторон кристаллов. Желто-зеленый эканит *B* внешне похож на эканит краевых зон двух других мест его нахождения. Спайность в сколах зерен не выражена и едва обнаруживается под микроскопом (см. дальше рис. 4), иногда отмечается несовершенная поперечная трещиноватость (спайность? отдельность), излом раковистый, похожий на излом кварца. Уд. вес 3,34—3,51 (по измерениям в отдельных зернах), твердость 5—5,5. Твердость, найденная С. И. Лебедевой микровдавливанием, у эканита *B* равна 572—734 кг/мм<sup>2</sup>.

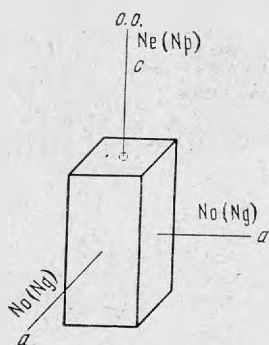


Рис. 1. Оптическая ориентировка эканита

Эканит Средней Азии сильно радиоактивен, но по-существу не метамиктен, так как дает четкие отражения на дебаеграмме и даже (крайне редко) на лауэграмме.

Магнитность его ничтожная — при обогащении он попадает в тяжелую неэлектромагнитную фракцию.

При всем непостоянстве в окраске, прозрачности, а также в степени проявления метамиктности, облик среднеазиатского эканита под микроскопом и его оптические константы оказываются практически одинаковыми (см. табл. 3).

По рельефу и интерференционной окраске эканит очень похож на апатит: показатели преломления низкие, двупреломление незначительное; удлинение его отрицательное. Эканит дает идеальную коноскопическую фигуру одноосного кристалла, оптический знак его (—) ( $2V = 0^\circ$ ); погасание прямое. Оптическая ориентировка определена И. В. Гинзбург на эканите *B* (рис. 1). Наименование кристаллографических осей (*c* и *a*) дано по осям оптической индикатрисы. Квадратные поперечные сечения эканита допускают его оптическую тетрагональность.

В отличие от изобилующего включениями цейлонского эканита (Gubelin, 1961) непрозрачный эканит *B*, судя по изучению под поляризационным и электронным микроскопом, содержит очень мало вторичных включений. Прозрачные и полупрозрачные среднеазиатские эканиты практически их лишены.

### МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ ЭКАНИТА

Кристаллы эканита внешне тетрагонального облика и, вместе с тем, напоминают вытянутые кубические кристаллы пирита, отчего возникла необходимость их измерения на гониометре. Визуально у эканита *A* определялись тетрагональная призма (100), пинакоид (001), а также подчиненные им призма другого рода и два рода пирамид (рис. 2). При отборе его кристаллов для гониометрических измерений выяснилось, что ребра основных граней, создающих прямоугольный габитус кристаллов, со всех сторон притуплены, как бы округлены. Из-за этого получается зрительное впечатление развития второстепенных граней (призмы второго рода и двух пирамид), которые признаны недостоверными. Округлые формы, как известно, не могут дать одного сигнала и измерения их невозможны.

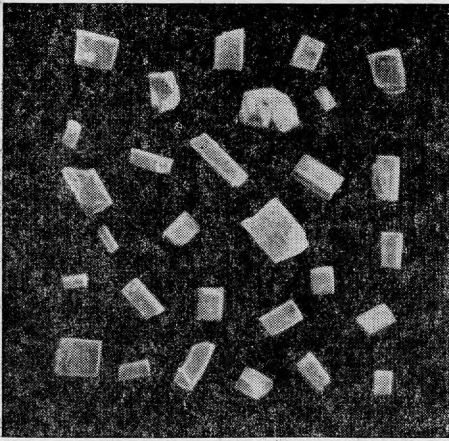


Рис. 2. Кристаллы азурита в натуральную величину

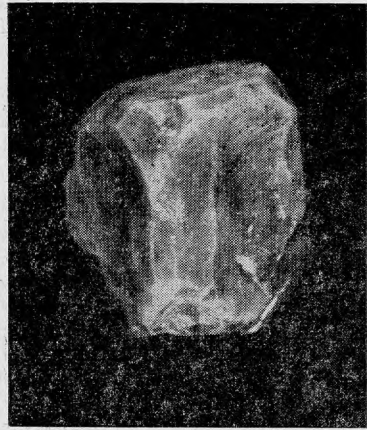


Рис. 3. Кристалл азурита, измеренный на гониометре,  $\times 6$

Из всех просмотренных кристаллов азурита *A* не удалось найти пригодные для измерения этих второстепенных граней.

Измерение же граней, создающих облик кристаллов и располагающихся под прямыми углами, не имело смысла для выяснения морфологической сингонии минерала.

Кристаллы азурита *B* тоже принимались за тетрагональные, поскольку они вытянуты по одной из осей. Помимо форм, создающих облик кристаллов: призмы и пинакоида, у них предполагалась призма другого рода, располагающаяся под углом  $45^\circ$  к главной, и два рода пирамид. Б. И. Омеляненко нашел несколько кристаллов с хорошо развитыми ровными блестящими гранями, один из которых, с полным их набором и наилучшим развитием (рис. 3) был измерен и рассчитан И. В. Гинзбург при любезном содействии Н. Н. Смольяниновой.

Величины граничных углов азурита совпадают с граничными углами кубических минералов (табл. 1) и его формам приданы наименования кубической сингонии. Наибольшее, но по существу незначительное отклонение

Таблица 1

Формы и граничные углы азурита

Наименование		ρ			φ			Характер сигналов	Размеры граней	Штриховка и кавернозность граней
индексы	буквы	кубическая сингония, по Дана и др. (1951)	азурит, вычислено по измерениям	отклонения	кубическая сингония, по Дана и др. (1951)	азурит, вычислено по измерениям	отклонения			
001 куб	<i>a</i>	0°00'	0°00'	0°00'				Яркий, четкий, редко раздвоенный	Широкие	В одном или в двух направлениях (вдоль или поперек)
011 ромбододекаэдр	<i>d</i>	45 00	45 09	0 09	0°00'	0°08'	0°03'	Яркий или бледный	Узкие	Только вдоль или только поперек
111 октаэдр	<i>o</i>	54 44	54 58	0 14	45 00	45 00	0 00	Яркий, четкий	Небольшие площадки	В направлениях ребер с гранями по (001)

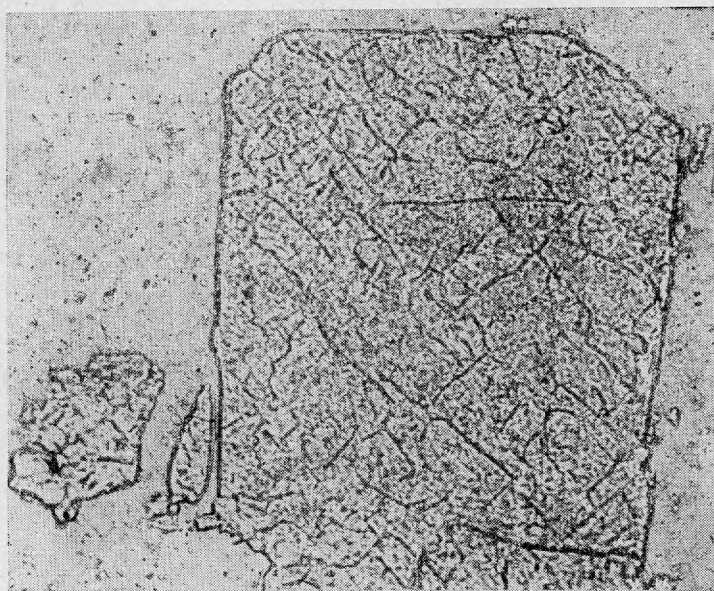


Рис. 4. Несовершенная спайность эканита по отношению к кубическим формам—октаэдрическая (поперечный разрез;  $\perp$   $Nz$ ;  $\times 150$ )



Рис. 5. Электронномикроскопический снимок со свежего скола эканита; угольная реплика;  $\times 3750$

от «кубичности» по  $\rho = 14'$  дает грань (111), та форма, по которой установлена морфологическая кубическая сингония эканита. Отклонения порядка  $8-14'$  по трем направлениям (см. табл. 2) отнесены за счет неидеальности кристаллов и допустимых погрешностей установки и отсчетов. Столь незначительные отклонения, очевидно, не могут служить показателем превращения кубической сингонии в тетрагональную. Всего у данного эканита определены три формы: основная — куб, создающая облик его кристаллов, и подчиненные — октаэдр и ромбододекаэдр.

Несовершенная спайность эканита, видная только под микроскопом при больших увеличениях (рис. 4) по отношению к внешним кубическим формам кристалла является по всей вероятности октаэдрической. Свежие сколы под электронным микроскопом имеют прямоугольные формы (рис. 5).

Эканиты *A*, как и подобные им эканиты *B*, по аналогии с измеренным эканитом *B* признаются морфологически кубическими с одной формой — гранями куба (001).

Внешняя огранка эканита, отвечающая кубической сингонии, не соответствует его оптической анизотропии. Следовательно, эканит может быть морфологически псевдокубическим.

#### РЕНТГЕНОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В отличие от метамиктного цейлонского эканита, не дающего, вследствие полной метамиктности, никаких отражений на рентгенограммах, среднеазиатский эканит дал дебаграммы с четкими линиями, что является главным свидетельством его кристалличности. Отражения на лауэграммах дал лишь эканит *B*.

Однофазность кристаллического эканита Средней Азии подтверждена изучением его под электронным микроскопом И. Д. Беляевой. При увеличениях в 6500 и 7500 на свежих сколах и на поверхностях граней угольная реплика показывает одну минеральную фазу.

Рентгенографическое изучение эканита проведено методом Дебая в камере РКД, откалиброванной по эталону, на железном нефилтрованном излучении при напряжении 35 кВ, силе тока 12 мА. Значения межплоскостных расстояний исправлены на толщину образца. Относительная интенсивность отражений оценена визуально по десятибалльной шкале.

Три химически анализированные эканита Средней Азии (см. табл. 4) дают совершенно одинаковые дебаграммы, не похожие на дебаграммы других известных минералов.

Дебаграммы природного кристаллического эканита отличны от дебаграмм раскристаллизованного при  $1250^\circ$  метамиктного эканита Цейлона.

Исходя из размеров элементарной ячейки цейлонского эканита, проиндцировать дебаграмму кристаллического эканита не удастся. Поэтому с целью определения сингонии изучаемого минерала Г. А. Сидоренко предпринято аналитическое индцирование его дебаграммы. Попытка проиндцировать последнюю в предположении кубической сингонии минерала не увенчалась успехом и была предположена тетрагональная симметрия его элементарной ячейки. С помощью логарифмической ячейки была выявлена серия отражений  $hko$ , которые дали значение параметра  $a'$ . Подбором простых индексов  $hko$  для первых сильных отражений с использованием полученной ранее величины  $a'$  определены значения  $c'$  и  $c'/a'$ . Эти величины позволили рассчитать значения межплоскостных расстояний, возможные при таких параметрах, и попытаться приписать

## Измеренные и вычисленные значения

Природный эканит Средней Азии				Прокаленный эканит Цейлона	
<i>hkl</i>	<i>d/n</i> -набл.	<i>l</i>	<i>d/n</i> вычисл.	<i>d/n</i>	<i>l</i>
200	7,31	9	7,37	7,57	Сил.
—	—	—	—	6,72	Сил.
220β	(5,68)	3	—	5,87	О. о. сл.
220	5,21	9	5,215	5,25	О. сл.
003	4,20	2	4,19	4,13	О. о. сил.
331β	(3,66)	5	—	—	—
331	3,35	10	3,35	3,35	О. сл.
420	3,30	6	3,30	3,30	О. о. сил.
—	—	—	—	3,22	О. о. сил.
332	3,05	2	3,04	3,04	О. сл.
512β	(2,90)	3	—	2,91	О. о. сл.
005β, 522β	(2,76)	1	—	2,77	Ср.
512	2,63	9	2,63	2,63	О. сил.
005, 522	2,50	6	2,51	2,54	О. о. сл.
—	—	—	—	2,485	Ср. сл.
533β	(2,39)	4	—	2,44	Ср. сл.
—	—	—	—	2,35	О. о. сл.
424	2,26	1	2,27	2,24	Ср. ш.
444β	(2,21)	1	—	2,22	Ср. ш.
533	2,16	7	2,16	2,17	О. о. сл.
515β	(2,07)	3	—	2,07	Ср. сл.
444	2,007	6	2,007	2,045	Ср. сл.
425	1,988	1	1,999	1,990	Ср. сл.
515	1,883	5	1,898	1,910	Ср.
—	—	—	—	1,870	Ср.
—	—	—	—	1,860	Ср.
406	1,820	7	1,822	—	—
—	—	—	—	1,805	Сил.
535	1,780	3	1,783	1,797	Сил.
—	—	—	—	1,755	О. о. сл.
307, 516	1,690	5	1,697	1,696	Ср.
—	—	—	—	1,663	Ср.
327	1,645	6	1,644	—	—
446, 536	1,622	5	1,633; 1,613	1,623	Ср. сил.
507	1,540	4	1,536	1,549	Ср. сл.
517	1,527	4	1,525	1,524	Ср.
—	—	—	—	1,491	Ср. ш.

Размеры тетрагональной элементарной ячейки природного кристаллического эканита равны:  
 Размеры тетрагональной элементарной ячейки эканита, раскristаллизованного из метамиктно

индексы всем наблюдаемым отражениям. Первая полученная величина  $a'$  равна 7,43; величина  $c'$  — 4,29  $kX$ . Однако эти параметры не позволили проиндцировать всего набора наблюдаемых отражений. Удвоенные второго параметра при том же первом также не дало положительных

Таблица 2

## межплоскостных расстояний эканита

Природный эканит Средней Азии				Прокаленный эканит Цейлона	
<i>hkl</i>	<i>d/n</i> набл.	<i>l</i>	<i>d/n</i> вычисл.	<i>d/n</i>	<i>l</i>
318, 447	1,486	1	1,488	1,483	Ср. сл.
—	—	—	—	1,464	Сл.
608 $\beta$	(1,457)	1	—	—	—
428	1,410	6	1,418	—	—
—	—	—	—	1,391	Ср.
518	1,382	6	1,382	1,379	Ср. сл.
528	1,361	2	1,362	—	—
608	1,324	4	1,323	—	—
339	1,297	4	1,295	—	—
0.0.10	1,262	4	1,262	—	—
1.1.10	1,248	4	1,246	—	—
449	1,231	3	1,230	—	—
609	1,211	3	1,211	—	—
4.0.10	1,195	3	1,189	—	—
4.1.10	1,183	3	1,182	—	—
4.2.10	1,175	4	1,174	—	—
—	1,160	1	—	—	—
—	1,142	3	—	—	—
—	1,117	2ш	—	—	—
—	1,102	1	—	—	—
—	1,085	1	—	—	—
—	1,067	2ш	—	—	—
—	1,051	2ш	—	—	—
—	1,043	1	—	—	—
—	1,036	3ш	—	—	—
—	1,025	3ш	—	—	—
—	1,006	1ш	—	—	—
—	0,9966	1ш	—	—	—

$a_0 = 14,75 \pm 0,1 \text{ \AA}$ ;  $c_0 = 12,56 \pm 0,1 \text{ \AA}$ ;  $c/a = 0,852$ .

го, равны:  $a_0 = 7,46$ ;  $c_0 = 14,96 \text{ \AA}$  (Anderson, a. o., 1961).

результатов. Но при  $a'$ , равном примерно  $7,43 \cdot 2$ , и  $c'$ , равном  $4,29 \cdot 3$ , удастся приписать индексы первым сорока отражениям и определить размеры тетрагональной элементарной ячейки:  $a = 14,75 \text{ \AA}$ ;  $c = 12,56 \text{ \AA}$ . Однако наблюдается значительный разброс параметров, определенных

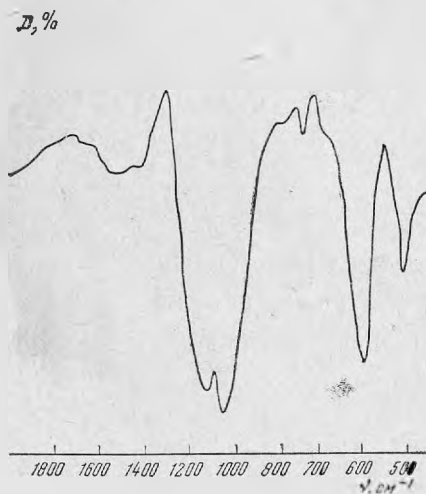


Рис. 6. Кривая ИК-спектра поглощения природного кристаллического эканита

по всей совокупности отражений в пределах  $0,15 \text{ kX}$ . Возможными причинами такого разброса могут быть или недостаточно точное индицирование, так как получен ограниченный ряд расчетных значений  $d/n$ , или более низкая симметрия минерала, нежели тетрагональная, но и в этом предположении отклонение от тетрагональности невелико и минерал может рассматриваться как псевдотетрагональный.

Значения межплоскостных расстояний, наблюдаемые и рассчитанные по определенным (средним значениям) размерам тетрагональной элементарной ячейки, интенсивность отражений и индексы отражающих плоскостей, сведены в табл. 2. Для сравнения в той же таблице даны значения  $d/n$  прокаленного эканита по данным проф. Г. Ф. Кларингбула из Англии.

Инфракрасный спектр эканитов *B* и *B* показал четкие полосы поглощения, свойственные кремнекислородным тетраэдрам (рис. 6). Полоса поглощения валентных колебаний имеет два максимума:  $1050$  и  $1110 \text{ см}^{-1}$ . Полоса деформационных колебаний разделена на три сильных максимума:  $440$ ,  $500$  и  $600 \text{ см}^{-1}$  и один слабый  $760 \text{ см}^{-1}$ . По заключению М. В. Ахмановой, неизвестен силикат с подобной конфигурацией кривой ИК-спектра области Si — O тетраэдров.

В ИК-спектре эканита сильное поглощение  $1400\text{--}1500 \text{ см}^{-1}$  относится к деформационным колебаниям гидроксила  $\text{OH}^{-1}$ , а слабое —  $1660^{-1}$  отвечает колебаниям молекул воды. Прокаливание до  $900^\circ$ , как и следовало ожидать, приводит к исчезновению полос  $\text{OH}$  и  $\text{H}_2\text{O}$  на ИК-спектре.

Дебаеграмма минерала не изменяется после прокаливании при  $900$  и при  $1200^\circ \text{C}$ . При  $1400^\circ$  эканит расплавляется.

#### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭКАНИТА

Химический состав средне-азиатского эканита охарактеризован более полно, чем цейлонского (табл. 3) не только по числу, но главным образом по качеству силикатных анализов.

Помимо основных компонентов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{CaO}$  и примесей  $\text{UO}_2$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , установленных в эканите с Цейлона, в эканитах Средней Азии определены высокие содержания  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TR}_2\text{O}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}^\pm$  и примесь  $\text{SrO}$ ,  $\text{Cs}_2\text{O}$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ . Спектральный анализ не увеличил списка элементов.

По содержанию  $\text{SiO}_2$  и  $\text{ThO}_2$  отечественные и зарубежные эканиты близки, но в отечественных этих окислов чуть меньше, за счет  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{TR}_2\text{O}_3$ . В эканитах Средней Азии по сравнению с цейлонскими вдвое меньше  $\text{CaO}$ , но есть щелочи.

Общее сходство химического состава позволяет относить оба минерала к одному минеральному виду, хотя цейлонский метамиктен и не может быть полностью сопоставлен со среднеазиатским.



Таблица 3

## Химический состав (вес.%) экзита и его некоторые свойства

Окислы	Средняя Азия, СССР				Цейлон	
	А	В	Б	Б'	1	2
SiO <sub>2</sub>	54,50	52,18	54,60	54,79	55,6	55
ThO <sub>2</sub>	26,47	26,74	23,74	Th ~ 25	27,6	28
TiO <sub>2</sub>	—	—	Нет	—	—	—
UO <sub>2</sub>	1,46	2,47	0,58	U ~ 1,3	2,1	3,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	0,18	0,10	—	0,5	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Нет	—	1,48	—	Следы	0,8
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,36	—	2,39	—	—	—
MgO	—	—	Нет	—	Следы	—
MnO	—	—	0,02	—	Следы	—
CaO	7,54	6,00	10,44	—	13,7	12
PbO	—	—	Не опр.	Pb ~ 0,23	0,8	0,65
SrO	—	—	0,02	—	—	—
Na <sub>2</sub> O	3,51	3,53	2,63	3,04	—	—
K <sub>2</sub> O	4,08	4,10	3,30	3,86	—	—
Li <sub>2</sub> O	—	—	—	0,009	—	—
Rb <sub>2</sub> O	—	—	—	0,03	—	—
Cs <sub>2</sub> O	—	—	—	0,001	—	—
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , -	1,02	4,40	0,32	—	—	—
F	—	—	0,26	—	—	—
Сумма	99,11	99,60	99,89	—	100,3	99,45
— O = F <sub>2</sub>	—	—	0,11	—	—	—
Сумма	—	—	99,78	—	—	—
Уд. вес	3,34	3,50	3,505	—	3,28	3,2849 —3,280
No	1,609	1,608	1,610	—	} 1,597	1,6095
Ne	1,603	1,605	1,603	—		—1,5901
	Зеленый, полупрозрачный		Желто-зеленый, не прозрачный		Зеленый, прозрачный	

А — (обр. 65630); аналитик М. Е. Казакова (полярнографическим методом ею определено 0,43% Pb); р.з.э. см. табл. 4;

В — (обр. 65186); аналитик Л. Л. Леонова; для ThO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub> ею колориметрически получены цифры, сходные с указанными цифрами силикатного анализа;

Б — (обр. 65185); аналитик Т. А. Бурова; расшифровку р.з.э. см. в табл. 4;

Б' — частные повторные определения из той же пробы: SiO<sub>2</sub> определено Д. А. Пчелинцевым; щелочи фотометрией пламени — Г. Е. Каленчук; Th, U, Pb — рентгеноспектральным анализом; спектральным анализом найдено 0,005% Си;

1 — аналитик Д. И. Ботвелл (Anderson а. о., 1961);

2 — аналитик не указан, допускается до 0,1% Y + La + Ce (Gubelin, 1961)

В соответствии с различием в химическом составе эканит Средней Азии является редкоземельно-щелочной разновидностью, а эканит Цейлона — известковой разновидностью.

Среди советских эканитов намечается две химически неодинаковые разности: I (анализы 1, 2, табл. 3) и II (анализы 3, 4, табл. 3). В I меньше CaO и TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, но больше UO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sup>±</sup>, чем во II. Кроме того, в I больше Y, Dy, Sm, Gd, а во II больше Nd, La, Ce (табл. 4).

Таблица 4

Результаты расшифровки р. з. э. эканита (%)					
Элементы	А'		Элементы	В	
La	8,2	14,4	Dy	4,1	1,7
Ce	34,7	40,0	Ho	—	0,3
Pr	5,1	6,0	Er	—	0,6
Nd	13,3	22,4			
Sm	8,2	4,6			
Gd	6,1	4,7	Сумма	100,2	100,0
Tb	2,1	0,5 } 5,3*			
Y	18,4 } 20,5*		4,8	TR, вес. %	0,36

Примечание. Определено методом хроматографии Г. М. Варшал из суммы р.з.э., найденных в ходе силикатного анализа.

\* Определалась сумма Y + Tb; значения Y и Tb вычислены из отношения Y : Tb = 9 : 1.

#### ФОРМУЛА ЭКАНИТА

Для метамиктного цейлонского эканита предложена формула Ca<sub>2</sub>Th · [Si<sub>8</sub>O<sub>20</sub>], содержащая 11 катионов. Расчет химических анализов кристаллических эканитов Средней Азии на основе 11 катионов привел к формулам с недостатком катионов в позиции Si, равным 0,5—0,6 (после помещения в нее всего Al и Fe<sup>3+</sup>) и с таким же избытком катионов в других позициях (табл. 5). Следовательно, такой тип формулы к эканиту Средней Азии не применим.

Расчет на основе Si = 8 дал формулы с суммой катионов около 12: для эканита B — 12,12, A — 11,90 и B — 11,87. Соответственно, в первом валентность катионов больше 40,00 (см. табл. 5), а в двух последних меньше 40,00 на 0,07.

Если найденной нами формуле эканита CaNaKTh[Si<sub>8</sub>O<sub>20</sub>] приписать параметры, полученные для отожженного метамиктного эканита Цейлона  $a_0 = 7,46$ ;  $c_0 = 14,96$  Å, то количество формульных единиц в элементарной ячейке будет равно 2.

Двое меньшая сумма катионов, равная 6 (при Si = 4), получена вычислением формулы с применением фактора  $V \cdot d \cdot 0,006023$  (Борнеман-Старынкевич, 1964). При этом найдена формула эканита (Ca, Na, K, Th, TR)<sub>2</sub> [Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>]. В элементарной ячейке при параметрах  $a_0 = 14,75$  kX и  $c_0 = 12,56$  kX получается 13 таких формульных единиц (см. табл. 5).

Подобно эканиту B формула цейлонского эканита, полученная на основе Si = 4, дает недостаток катионов, а на основе Σ катионов = 6 — сильный избыток Si.

Общий тип формулы эканита Средней Азии A[Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>], где A — это Na, K, Ca, Th, TR (рис. 6).

Главное отличие кристаллохимических формул эканита Средней Азии —  $\text{CaNaKTh}[\text{Si}_8\text{O}_{20}]$  и Цейлона —  $\text{Ca}_2\text{Th}[\text{Si}_8\text{O}_{20}]$  состоит в том, что в первом из них проявлен изоморфизм по схеме  $\text{Ca} \rightarrow (\text{Na} + \text{K})$ ;  $\square \rightarrow (\text{Na} + \text{K})$ .

Появление дополнительного катиона и вероятное упорядоченное размещение  $\text{K}$  и  $\text{Na}$  могут быть причиной специфических черт среднеазиатского эканита по сравнению с цейлонской разновидностью.

Содержание в эканите р.з.э. ( $> 2$  вес.%) связано, вероятно, с изоморфным вхождением их на места  $\text{Ca}$  и  $\text{Th}$ .

### УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ ЭКАНИТА

На Цейлоне эканит встречен в россыпном месторождении Элауола, вблизи Эхелиягода (штат Ратнопура). Он добывается там как драгоценный камень из алювиальных отложений (в ямах самоцветов) совместно с сапфиром, гранатом, шпинелью, турмалином, цирконом. Обрабатывается в форме кабагона, иногда имеющего звездчатый перелив света.

Возраст цейлонского эканита 560—565 млн. лет; первичными породами весьма предположительно считаются гранитные пегматиты (Gubelin, 1961).

Эканитовая минерализация в Средней Азии связана с комплексом щелочных и нефелиновых сиенитов. Их интрузии, условно относимые к нижней перми, прорывают складчатые, регионально-метаморфизованные песчано-глинистые сланцы с подчиненными известняками и другими первично-осадочными породами различных периодов палеозоя. Особенностью этой щелочной провинции является широкое развитие приконтактовых метасоматических образований. Но только недавно (в 1957—1963 гг.) Б. И. Омеляненко и Л. Л. Перчуком была установлена инфльтрационно-метасоматическая их природа и выделены многочисленные типы метасоматических колоннок с апосланцевыми и апосиенитовыми зонами. Благодаря этому, для районов *Б* и *В* представилась возможность в первом приближении отнести эканит к определенным зонам метасоматитов, хотя колонки с участием этого минерала специально не изучались. В районе участка *А* метасоматическая зональность с точки зрения физико-химической петрологии не рассматривалась, но есть основания по аналогии относить ее к инфльтрационно-метасоматической, а в парагенезисах эканита видеть признаки сходства с двумя другими описанными здесь районами его нахождения.

Приведем краткое описание участков распространения эканита. На участке *Б* (по сообщению нашедшего его в 1956 г. Б. И. Омеляненко) он содержится в кварцевом эгириновом сиените, залегающем в виде дайки во флишеидных парасланцах. Эти кварцевые эгириновые сиениты, очевидно, являются продуктом преимущественно апосланцевого инфльтрационного метасоматоза, известного под названием процесса альбитизации. Внутренние зоны чистого альбита и альбита + эгирина здесь недоразвиты, а внешние зоны альбита + эгирина + микроклина и кварца (+ арфведсонита) + эгирина + альбита + микроклина + кальцита, напротив, практически слагают всю «дайку». В этой дайке широко развита более поздняя явно наложенная ассоциация кварца, флюорита, пектолита (определен оптически, спектрально и рентгеновски) и кальцита. Эти минералы в виде согласных и отчасти секущих прожилков пересекают метасоматиты, возникшие при альбитизации.

На участке *В* эканит, обнаруженный в 1962 г. М. О. Сулеймановым, находится в кварц-полевошпатово-карбонатных породах, образующих живообразные тела в толще песчано-глинистых сланцев, а также

## Пример расчета

Окислы	Вес. %	Молекулярный вес	Молекулярные количества	Атомные количества катионов (без CaF <sub>2</sub> )	I	
					Основа Σ катионов: 11 = 1257	
					Атомы катионов	Σ валентностей
SiO <sub>2</sub>	54,60	60,06	9091	9091	7,26	29,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,48	101,94	145	290	0,23	0,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	159,70	6	12	0,01	0,03
MnO	0,02	70,93	3	3		
CaO	10,44	56,08	1862	1794*	1,43	2,86
Na <sub>2</sub> O	2,63	61,99	424	848	0,67	0,67
K <sub>2</sub> O	3,30	94,19	350	700	0,55	0,55
H <sub>2</sub> O±	0,32	18,0	178	(356)	(0,28)	
F	0,26	19,0	137			
ThO <sub>2</sub>	23,74	264,12	899	899	0,72	2,88
SrO	0,03	103,63	3	3		
UO <sub>2</sub>	0,58	286,07	20	20	0,01	0,04
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	325,84	11	22	0,02	0,06
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,94	328,26	21	42	0,04	0,12
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55	336,54	16	32	0,03	0,09
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	329,84	4	8		
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	348,20	3	6		
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	361,80	3	6		
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	372,92	1	2	0,02	0,06
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	377,88	0,3	0,6		
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	382,40	0,6	1,2		
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	365,80	0,3	0,6		
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	225,84	5	10	0,01	0,03
Сумма	99,89				Σ 11,00	37,12
— O = F <sub>2</sub>	0,11					
Сумма	99,78					

\* Из атомного количества CaO = 1862 вычтено 68, эквивалентное 137 F, согласно формуле флюорита CaF<sub>2</sub>, присутствующего совместно с эканитом.

## Коэффициенты при катионах

Обозначение образцов	Ca	Na	K	Th	Tb	U	Pb
B	0,78	0,38	0,30	0,39	0,06	0,01	—
A	0,60	0,50	0,39	0,45	0,01	0,02	0,01
B	0,50	0,53	0,40	0,47	—	0,04	—
I	1,06	—	—	0,46	—	0,03	0,02

Примечание. A, B, B — Средняя Азия; I — Цейлон (табл. 3).

Таблица 5

формулы эканита

II		III		IV		
Основа Si: 8 = 1136		Основа Σ катионов: 12 = 1149		Основа — фактор = 57,61		
Атомы катионов	Σ валентностей	Атомы катионов	Σ валентностей	Атомы катионов	Атомы катионов : 13	Σ валентностей
8,00	32,00	7,91	31,64	52,37	4,03	16,12
0,25	0,75	0,25	0,75	2,10	0,16	0,48
0,01	0,03	0,01	0,03	0,07	0,01	0,03
1,58	3,16	1,56	3,12	10,34	0,80	1,60
0,74	0,74	0,74	0,74	4,88	0,38	0,38
0,61	0,61	0,61	0,61	4,03	0,31	0,31
0,79	3,16	0,78	3,12	5,18	0,40	1,60
0,02	0,08	0,02	0,08	0,12	0,01	0,04
0,02	0,06	0,02	0,06	0,13	0,01	0,03
0,04	0,12	0,04	0,12	0,26	0,02	0,06
0,03	0,09	0,03	0,09	0,18	0,02	0,06
0,02	0,06	0,02	0,06	0,14	0,01	0,03
0,01	0,03	0,01	0,03	0,06		
12,12	40,89	12,00	40,45	79,90	6,16	20,74

Пояснение к основам расчета:

Вся сумма катионов: 11 = 13 790 : 11 = 1257 (I); Si : 8 = 9091:8 = 1136 (II), 13 790 : 12 = 1149 (13 790 : 6 = 2298) (III); атомные количества катионов делятся на эти основы. Фактор получен из формулы  $a_s \cdot c_s \cdot d \cdot 0,006023$ ;  $14,75^2 \cdot 1256 \cdot 3,50 \cdot 0,006023 = 57,61$  (IV); атомные количества множатся на этот фактор и полученные значения делятся на 13. Число 13 выбрано аналитически и годится для всех эканитов табл. 5. (Здесь  $57,61 : 13 = 4,0$ ;  $79,90 : 13 = 6,1$ ).

Таблица 6

формул эканитов

Al	Fe <sup>3+</sup>	Σ	Si	Al	W = 20,00 *	Основа расчета
0,08	—	2,00	3,95	0,05	+0,34	Σк. : 6 = 2298
—	0,01	1,99	4,01	—	+0,09	Σк. : 6 = 2225
—	0,01	1,95	4,00	—	—	Si : 4 = 2174
—	0,03	1,60	4,00	—	+0,18	Si : 4 = 2516

\* Означает теоретическую сумму валентности катионов = 20,00.

в мощных зонах метасоматитов, располагающихся между «жилами» карбонатитов и сиенитами или же кварцевыми сиенитами. Согласно данным Перчука, здесь мы имеем дело с разнообразными типами инфильтрационно-метасоматических колонок зон карбонатизации, возникающих по разнообразным сланцам и роговикам, а также по нефелиновым сиенитам и эгириновым (бескварцевым и кварцевым) сиенитам. Из парагенезисов эканита вытекает преобладающее его развитие в апосланцевых зонах карбонатизации. На этом же участке М. О. Сулеймановым найдены «жилы» альбитита, очевидно являющиеся тыловыми зонами инфильтрационно-метасоматического процесса альбитизации.

На участке А еще в 1948—1949 гг. Ю. А. Араповым отмечался эканит, но тогда он не был точно диагностирован. По новым данным В. Д. Дусматова, который исследовал этот район в 1961—1962 гг., эканит присутствует в так называемых кварц-эгирин-микроклин-альбитовых жилах с примесью кальцита (в краевых зонах со сфеном), в кальцит-альбитовых породах (с эгирином) и в эгириновых сиенитах, содержащих микроклин, альбит и немного кварца. Перечисленные породы располагаются в первично-осадочных метаморфизованных сланцах переменного состава. Складывается впечатление, что эти эканитсодержащие породы участка А по степени щелочности являются промежуточными между типичными зонами альбитизации и типичными зонами карбонатизации. В них широко развит кальцит, характерный для зон карбонатизации, тогда как амфиболы и пироксены видимо представлены менее натровыми разновидностями, чем в зонах карбонатизации, так как оптически похожи на пироксены и амфиболы зон альбитизации.

Породы с аксессуарным эканитом из трех указанных пунктов по своему шпирово-полосчатому облику и другим текстурно-структурным особенностям, по парагенезису минералов в целом и взаимному расположению и сочетанию минералов, а также по формам их выделения, цвету и остальным внешним признакам и, наконец, по оптическим свойствам большинства из них настолько близки между собою, что кажутся произошедшими из одного места. Постоянный типоморфизм минералов, ассоциирующих с эканитом, свидетельствует прежде всего о геохимическом родстве породивших их процессов.

Приуроченность эканита к морфологически выраженным зонам — полосам метасоматитов и взаимоотношения его с минералами этих полос — зона следующие. В зонах чистого альбита и чистого кальцита (т. е. в сплошных карбонатитах) эканит лишь изредка сохраняется как реликтовый минерал и находится здесь в виде отдельных кристаллов или в сочетании с крупными зернами серого реликтового микроклина. В зонах кварца эканит образует идеальные кристаллы с блестящими гранями, что служит признаком совместного их выделения (или развития эканита на месте кварца).

Показательно разрастание эканита по крупным кристаллам микроклина, а также по его мелкозернистому агрегату. Выборочное замещение микроклина эканитом четко выражено в случае синовидных кристаллов эканита, сохраняющих микроструктурный рисунок кварца и альбита «основной массы». Прослеживается замещение эканита пластинчатым альбитом по трещинам и с краев. Местами кристаллы эканита отделены от микроклина оторочками мелких зерен кварца, а от кварца — «прожилками» кальцита; трещины в эканите залечиваются кварцем и кальцитом.

Характерны взаимоотношения эгирина и эканита: в зонах альбита, кальцита, кварца они всегда разобщены, как и в остальных зонах. По эгирину и эканиту различаются зоны, имеющие сходный набор остальных

минералов: альбита и микроклина ( $\pm$  арфведсонит,  $\pm$  кальцит). Эгириин и эканит непосредственно соприкасаются только на границах обогащенных ими зон, но без каких-либо проявлений взаимодействия. Обычно же они отделены друг от друга кварц-альбит-микроклиновой «основной» массой. Иногда отмечают признаки собирательной перекристаллизации эканита, крупные кристаллы которого находятся в средней части кварц-полевошпатовых полос — зон, окруженных эгириинсодержащей зоной. О несколько более позднем образовании эканита относительно эгирина говорят вращение кристаллов эканита в зону эгирина, а также секущее до перпендикулярного положение удлиненных кристаллов эканита относительно согласной с границами зон «гнейсовидности» эгирина. Совместно с арфведсонитом эканит не наблюдается.

Итак, эканит развивается по микроклину и устойчив с кварцем, альбитом, кальцитом в одних зонах; он неустойчив в присутствии эгирина и замещается альбитом и кальцитом — в других зонах. Эканит накапливается в кварц-полевошпат-кальцитовых парагенезисах, ограниченных, по-видимому, с одной стороны, зоной мономинерального альбита или зоной мономинерального кальцита, а с другой — эгириин-альбит-микроклиновой зоной.

Эканит, следовательно, мог возникнуть в колонках зон альбитизации, в колонках зон карбонатизации и отчасти в колонках смешанного типа с карбонатизацией, наложенной на альбитизацию. Судя по наблюдающимся парагенезисам с кварцем, эканит входит в состав метасоматитов, развитых на месте первично-осадочных сланцевых пород, поскольку в составе метасоматитов, возникших за счет первично-магматических сиенитов, кварц неизвестен. Эканит как бы заменяет эгириин: 1) в зоне кварц, альбит, микроклин, эгириин (арфведсонит), кальцит в апосланцевой метасоматической колонке зон альбитизации и 2) в зоне кальцит, эгириин ( $\pm$  Mg-арфведсонит), альбит, микроклин ( $\pm$  остаточный кварц) в апосланцевой метасоматической колонке зон карбонатизации.

Зоны, содержащие эканит, отображают, по-видимому, дополнительную зональность в инфильтрационно-метасоматических колонках обоих типов (альбититовой и карбонатитовой), так как в эгириновой и в эканитовой зонах сохраняется одинаковое число устойчивых минералов. Если это так, то появление эканита следует связывать с осаждением второстепенного элемента — Th, вследствие явления взаимодействия инфильтрационного потока растворов с минералами пород.

Показателем относительной кислотности — щелочности растворов в трех пунктах нахождения эканита служит сам состав этого минерала. Понижение содержания Са в эканите от А к В до В при соответственном повышении содержания Na + К от первого (и второго) к третьему из них, отображает все возрастающую щелочность растворов. Это подтверждается, в частности, более высокой щелочностью растворов, обусловивших образование карбонатитов, по сравнению с растворами, породившими альбититы. Высокое содержание таких элементов — примесей в эканите В, как р.з.э., которые являются слабыми основаниями, указывает на его образование в условиях большей кислотности растворов. Эканит А (и особенно В?) с низким содержанием р.з.э., выпали при меньшей кислотности, т. е. при большей щелочности растворов.

В этой связи можно допустить, что цейлонский эканит возник в условиях наиболее низкой активности щелочей, которая возможна при явлениях кислого метасоматоза, связанного с постмагматической деятельностью гранитного очага.

минералов: альбита и микроклина ( $\pm$  арфведсонит,  $\pm$  кальцит). Эгириин и эканит непосредственно соприкасаются только на границах обогащенных ими зон, но без каких-либо проявлений взаимодействия. Обычно же они отделены друг от друга кварц-альбит-микроклиновой «основной» массой. Иногда отмечают признаки собирательной перекристаллизации эканита, крупные кристаллы которого находятся в средней части кварц-полевошпатовых полос — зон, окруженных эгириносодержащей зоной. О несколько более позднем образовании эканита относительно эгирина говорят вращение кристаллов эканита в зону эгирина, а также секущее до перпендикулярного положение удлиненных кристаллов эканита относительно согласной с границами зон «гнейсовидности» эгирина. Совместно с арфведсонитом эканит не наблюдается.

Итак, эканит развивается по микроклину и устойчив с кварцем, альбитом, кальцитом в одних зонах; он неустойчив в присутствии эгирина и замещается альбитом и кальцитом — в других зонах. Эканит накапливается в кварц-полевошпат-кальцитовых парагенезисах, ограниченных, по-видимому, с одной стороны, зоной мономинерального альбита или зоной мономинерального кальцита, а с другой — эгириин-альбит-микроклиновой зоной.

Эканит, следовательно, мог возникнуть в колонках зон альбитизации, в колонках зон карбонатизации и отчасти в колонках смешанного типа с карбонатизацией, наложенной на альбитизацию. Судя по наблюдающимся парагенезисам с кварцем, эканит входит в состав метасоматитов, развитых на месте первично-осадочных сланцевых пород, поскольку в составе метасоматитов, возникших за счет первично-магматических сиенитов, кварц неизвестен. Эканит как бы заменяет эгириин: 1) в зоне кварц, альбит, микроклин, эгириин (арфведсонит), кальцит в апосланцевой метасоматической колонке зон альбитизации и 2) в зоне кальцит, эгириин ( $\pm$  Mg-арфведсонит), альбит, микроклин ( $\pm$  остаточный кварц) в апосланцевой метасоматической колонке зон карбонатизации.

Зоны, содержащие эканит, отображают, по-видимому, дополнительную зональность в инфльтрационно-метасоматических колонках обоих типов (альбититовой и карбонатитовой), так как в эгириновой и в эканитовой зонах сохраняется одинаковое число устойчивых минералов. Если это так, то появление эканита следует связывать с осаждением второстепенного элемента — Th, вследствие явления взаимодействия инфльтрационного потока растворов с минералами пород.

Показателем относительной кислотности — щелочности растворов в трех пунктах нахождения эканита служит сам состав этого минерала. Понижение содержания Са в эканите от *A* к *B* до *B* при соответственном повышении содержания Na + K от первого (и второго) к третьему из них, отображает все возрастающую щелочность растворов. Это подтверждается, в частности, более высокой щелочностью растворов, обусловивших образование карбонатитов, по сравнению с растворами, породившими альбититы. Высокое содержание таких элементов — примесей в эканите *B*, как р.з.э., которые являются слабыми основаниями, указывает на его образование в условиях большей кислотности растворов. Эканит *A* (и особенно *B*?) с низким содержанием р.з.э., выпали при меньшей кислотности, т. е. при большей щелочности растворов.

В этой связи можно допустить, что цейлонский эканит возник в условиях наиболее низкой активности щелочей, которая возможна при явлениях кислого метасоматоза, связанного с постмагматической деятельностью гранитного очага.



### ГЛАВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭКАНИТА

В процессе изучения среднеазиатского эканита, представляющего собою особую разновидность этого минерала, определена кубическая форма его кристаллов, оптическая одноосность и тетрагональность. Установлена рентгеновская тетрагональность и вычислены размеры его элементарной ячейки. На основе трех новых химических анализов выведена формула минерала  $\text{CaNaKTh}[\text{Si}_8\text{O}_{20}]$ . Охарактеризованы условия нахождения минерала, образованного в постмагматическую стадию инфильтрационного метасоматоза вмещающих пород, который сопровождал интрузии щелочной магмы среднего состава.

Сопоставление эканита Средней Азии и Цейлона приведено в табл. 7.

Таблица 7

Сравнение эканита СССР и Цейлона

Свойства	Средняя Азия	Цейлон
Кристаллы	Кубические (псевдокубические ?)	Неизвестны
Оптика	Одноосный отрицательный удлинение (-) $N_o = 1,610-1,608$ ; $N_e = 1,605-1,603$	Изотропный $N = 1,609-1,590$
Цвет	Зеленый, желто-зеленый	Зеленый, желто-зеленый
Уд. вес.	3,51—3,34	3,28
Физическое состояние	Кристаллический, с четкой дебаеграммой	Метамиктный (дает дебаеграмму только после прокаливании при $t$ свыше $1200^\circ\text{C}$ )
Элементарная ячейка	Тетрагональная (псевдотетрагональная?) $a_0 = 14,75 \text{ kX}$ $c_0 = 12,56 \text{ kX}$	Тетрагональная (псевдокубическая) $a_0 = 7,46 \text{ \AA}$ $c_0 = 14,96 \text{ \AA}$
Формульные единицы	$(\text{Ca, Na, K, Th, TR})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ $Z = 13$	$\text{Ca}_2\text{Th}[\text{Si}_8\text{O}_{20}]$ $Z = 2$
Нахождение	В щелочных метасоматитах постмагматической стадии	В россыпи

### ЛИТЕРАТУРА

- Борнеман-Старынкевич И. Д. Руководство по расчету формул минералов. Изд-во «Наука», 1964.
- Дэна Дж. Д. и др. Система минералогии. Перевод с англ. ИЛ, т. 1, 1951.
- Anderson W. W., Claringbull G. F., Davis R. J., Hill D. K. et al. Ekanite a new metamikt gem from Ceylon.— Nature, 1961, 10.
- Gubelin E. J. Ekanite another new metamikt gem Ceylon.— Gems and Gemology, 1961, 10, N 6.