

З. В. ПУДОВКИНА, Ю. А. ПЯТЕНКО

О ЦИРКОНОЛИТЕ
И ЕГО КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

В последние годы в отечественной литературе неоднократно приводились результаты исследований весьма интересного минерала из комплексных массивов ультраосновных и щелочных пород, а также карбонатитовых месторождений СССР — цирконолита (Бородин и др., 1956, 1960; Пудовкина, Пятенко, 1964). Однако этот минерал фигурирует в нашей литературе (как показано в дальнейшем — неоправданно) и под другим названием — циркелит (Булах и др., 1960; Семенов, 1963; Булах, 1963). Анализ литературы приводит к выводу об отсутствии единого мнения исследователей по поводу интерпретации результатов рентгенографического и кристаллографического изучения этого минерала. С другой стороны, бесспорно одно: все авторы прямо или косвенно согласны с тем, что отечественные цирконолиты и циркелиты представляют собой один минеральный вид и поэтому должны иметь одно название по минералогической номенклатуре. Тем не менее вопрос о том, какое из названий следует считать более целесообразным и правильным, до сих пор не решен.

Авторы полагают, что результаты экспериментальных исследований минерала, приводимые в настоящей работе¹, а также критический анализ относящегося к теме литературного материала устранят значительную часть неясностей и неопределенностей, связанных с рассматриваемым минералом.

Цирконолит — метамиктный сложный окисел, характеризующийся химической brutto-формулой A_4O_7 , где А — Са, Zr, Ti, Nb, Fe, TR и другие катионы. Некоторые образцы минерала, в частности образец из Африканды, которому Л. С. Бородин впервые дал название цирконолит (Бородин и др., 1956), имеют относительно простой состав и хорошо аппроксимируются стехиометрической формулой $CaZrTi_2O_7$. В естественном состоянии цирконолит полностью или почти полностью рентгеноаморфен. Порошковые дифракционные картины, наблюдаемые иногда от непрокаленных образцов (например, цирконолита из Алданской провинции), обычно представлены несколькими слабыми линиями, которые сопровождаются значительным фоном рентгенограммы. Нетрудно устано-

¹ Здесь приведены лишь основные результаты экспериментальных исследований. Детали и методические подробности можно найти в цитируемых специальных статьях.

вить, что эти линии представляют собой наиболее интенсивные отражения (111, 220, 311) кубической структуры, производной от типа $\text{CaF}_2\text{—CeO}_2$ и характеризующейся параметром $a \approx 5,1 \text{ \AA}$.

Весьма примечательно, что хотя отмеченные линии очень слабы, они, как правило, не обнаруживают сколь-либо существенной диффузности. Поэтому можно предполагать, что указанные отражения обусловлены не высокодисперсными кристаллическими частицами, а небольшим числом достаточно крупных участков, имеющих кристаллическое строение. На рентгенограммах от образцов цирконолита, выдержанных при температурах 400, 600 и 800°, можно наблюдать постепенное увеличение числа линий, разрешенных кубической F -решеткой, причем при 800° мы обычно имеем уже законченный набор интерференций. Отметим, что для полностью метамиктных выделений первые отражения рентгенограмм могут появляться при температурах выше 400°, однако для всех известных авторам образцов при температурах порядка 800° цирконолит дает весьма четкую дифракционную картину. Величина параметра решетки, возникающей при прокаливании кубической фазы, при переходе от образца к образцу колеблется в узких пределах: 5,03—5,07 Å.

Принимая во внимание весьма сложный состав цирконолита, нетрудно прийти к выводу о невозможности упорядоченного распределения атомов в рамках ячейки с ребром $a \approx 5,1 \text{ \AA}$. Последующий анализ показал, что возникающую при умеренных температурах прокаливании кубическую фазу следует рассматривать как метастабильную неупорядоченную постройку, как паллиатив, при котором катионы распределены хотя и неупорядоченно, но по энергетически (и геометрически) выгодным позициям — в узлах кубической гранецентрированной решетки. В одной из работ специально рассмотрен механизм образования структур, производных от кубического типа флюорита — церианита, а также некоторые условия формирования таких структур (Пятенко, 1963). При соответствующем анализе было установлено, что вещественный состав цирконолита, выражаемый обобщенной формулой $AZrB_2O_7$ и представленный крупными, средними и небольшими по «размеру» катионами, оказывается весьма подходящим материалом для образования указанных производных структур.

Разбираемые кубические фазы и особенно их рентгеновские дифракционные картины лишены индивидуальности и не могут служить основой для диагностики цирконолита: подобные фазы формируются при прокаливании многих метамиктных минералов (например, эшинита, кобеита и других сложных окислов). Можно, наконец, предположить, что рассматриваемые кубические фазы в ряде случаев представляют собой промежуточное звено и при метамиктном распаде минералов.

Если образцы цирконолита прокалить при 1100—1200°, то наблюдается новая, значительно более сложная дифракционная картина. Ранее отмечалось (Бородин и др., 1960), что высокотемпературная дифракционная картина цирконолита вполне индивидуальна и по ней можно безошибочно диагностировать этот минерал. Хотя такая картина весьма стабильна для различных образцов, в литературе до последнего времени мы сталкиваемся если не с утверждением, то во всяком случае с настойчивым предположением о неоднородности продукта высокотемпературного прокаливании цирконолита (Булах, 1963). Однако недавно (Пудовкина, Пятенко, 1964) доказана ошибочность этого предположения. Нами было установлено, что при нагревании цирконолита, начиная примерно с 1000°, происходит постепенное фазовое превращение, заканчивающееся к 1100—1200° и приводящее к образованию одной, новой, упорядоченной фазы низкой симметрии. Исследованию этой фазы предшествовало рентгенографическое изучение синтетического аналога цирконолита — кристаллов $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ (Пятенко, Пудовкина, 1964).

Знание кристаллографических характеристик искусственного соединения $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ оказало весьма существенную помощь при установлении специфических особенностей нашей высокотемпературной модификации. Доказано (Пудовкина, Пятенко, 1964), что структура этой фазы, как и структура рассмотренной неупорядоченной метастабильной модификации, представляет собой производную от типа $\text{CaF}_2-\text{CeO}_2$. Однако если неупорядоченная фаза сохраняет кубическую симметрию структуры-прототипа, то новая упорядоченная фаза имеет решетку с гексагональной метрикой при истинной, еще более низкой, моноклинной симметрии структуры в целом.

Схема перехода от исходной идеальной кубической ячейки типа CaF_2 к истинной моноклинной представлена на рис. 1. Здесь приведен фрагмент катионного мотива, охватывающий девять кубических ячеек, ориентированных так, что с нормалью к плоскости чертежа совпадают оси второго порядка исходной структуры. Кружки символизируют узлы F -решетки (=катионы структуры), располагающиеся на различных уровнях ($0, \frac{1}{2}$ и $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}$). Если a_1, a_2, a_3 — ребра-вектора исходной кубической ячейки и a, b, c — ребра моноклинной (рис. 1), то переход от кубической к моноклинной ячейке осуществляется по следующей векторной схеме:

$$\left. \begin{aligned} a &= -a_1 - a_2 + 2a_3, \\ b &= a_1 - a_2, \\ c &= \frac{3}{2} a_1 + \frac{3}{2} a_2 + a_3. \end{aligned} \right\} (1)$$

Соответствующая матрица перехода имеет вид: $\left| \begin{array}{cc|c} 1 & 1 & 2 \\ 1 & -1 & 0 \\ \hline \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & 1 \end{array} \right|$.

Для того чтобы получить представление о метрике решетки реальной моноклинной структуры, следует мысленно деформировать (сжать) приведенное на рис. 1 идеальное изображение вдоль одной из осей третьего порядка кубической ячейки, лежащей в плоскости чертежа и показанной на рисунке пунктирной линией. Очевидно, что в таком случае исходные кубические ячейки превращаются в ромбоэдры, а результирующая решетка в целом приобретает гексагональную метрику. Было установлено, что деформация исходной кубической ячейки невелика: в итоге образуется ромбоэдр с углом $\alpha = 92^\circ$. Поэтому псевдогексагональная структура «высокотемпературной» фазы цирконолита (имеющая практически строго гексагональную метрику решетки) оказывается одновременно псевдокубической.

Можно показать, что моноклинная решетка, построенная на векторах a, b, c [система (1)], приобретает гексагональную метрику в тех случаях, когда соблюдаются два условия: $a = b\sqrt{3}$, $-\cos\beta = a/bc$. Для разбираемой высокотемпературной фазы приведенные условия выполняются весьма строго, в чем можно убедиться, если исходить из параметров решетки этой фазы, определенных из рентгенограммы порошка (табл. 1): $a = 12,58 \pm 0,02 \text{ \AA}$, $b = 7,27 \pm 0,01 \text{ \AA}$, $c = 11,44 \pm 0,02 \text{ \AA}$, $\beta = 100^\circ 34' \pm 5'$. (Условия съемки рентгенограммы: камера РКУ-114, фильтрованное Cu -излучение, поправки по NaCl .) Параметры псевдо-ячеек: ромбоэдрической $a_0 = 5,05 \text{ \AA}$, $\alpha = 92^\circ 00'$ и соответствующей ей гексагональной (дважды центрированной) $a_{\text{H}} = 7,27$, $c_{\text{H}} = 8,44 \text{ \AA}$, $c_{\text{H}}/a_{\text{H}} = 1,161$. Рентгенограмма порошка высокотемпературной фазы весьма характерна (табл. 1): наиболее интенсивными оказываются отражения, которым могут быть приписаны гексагональные (ромбоэдрические) индексы, соответствующие приведенным выше псевдо-ячейкам. Вспоминая о кубическом прототипе, констатируем, что это именно те

отражения (линии), которые разрешены исходной кубической F -решеткой («основные» отражения). Остальные весьма слабые линии, не индифферентные в гексагональных осях, представляют собой типичные сверхструктурные отражения, указывающие на истинную моноклинную симметрию структуры¹. Отметим, что в первой графе табл. 1 почти каждому отражению соответствует несколько моноклинных индексов. В большинстве случаев наложение рефлексов вызывается отмеченной «гексагонализацией» решетки, а не так называемой неоднозначностью индексирования, свойственной рентгенограммам порошка. Можно показать, что в нашем случае на рентгенограмме попарно сливаются те отражения, моноклинные индексы которых $h_1k_1l_1$ и $h_2k_2l_2$ удовлетворяют соотношению:

$$(h_1^2 - h_2^2) + 2(k_1^2 - k_2^2) + 12(l_1^2 - l_2^2) + 4(h_1l_1 - h_2l_2) = 0.$$

Итак, мы располагаем необходимыми сведениями об основных морфологических характеристиках предполагаемых макрокристаллов, отвечающих рассмотренной высокотемпературной фазе. Очевидно, что эти кристаллы при их даже достаточно точных гониометрических измерениях должны восприниматься как гексагональные, хотя они одновременно и псевдокубические. В табл. 2 проведена оценка степени «псевдокубичности» предполагаемых кристаллов. В первых трех колонках этой таблицы сопоставлены теоретические значения сферической координаты ρ для нескольких граней гипотетического истинно кубического кристалла и предполагаемого кристалла нашей 1100°-фазы. Оба кристалла рассматриваются в гексагональной установке, причем нетрудно показать, что кубическому случаю соответствует величина $c/a = \sqrt{3}/\sqrt{2} = 1,225$.

Из сравнения данных табл. 2 следует, что отклонения теоретических значений угловых величин предполагаемых кристаллов исследуемой высокотемпературной фазы от кубических стандартных значений невелики (1—1,5°). Тем не менее эти отклонения можно уверенно фиксировать при гониометрических измерениях (конечно, при условии достаточно хорошего качества оптических рефлексов).

Морфологические особенности кристаллов метамиктных минералов представляют собой единственное надежное основание для суждений о первоначальной, «дометамиктной» структуре этих минералов. Исключение составляют кубические кристаллы: стандартность угловых величин этих кристаллов не позволяет делать сколь-либо однозначные выводы. К счастью, интересующие нас образцы должны быть лишь псевдокубическими, с величиной c/a , заметно отличающейся от соответствующей величины для истинно кубических кристаллов.

В работе, посвященной первой находке и первому описанию цирконолита (Бородин и др., 1956), отмечается близость химического состава этого минерала и состава так называемой разновидности циркелита

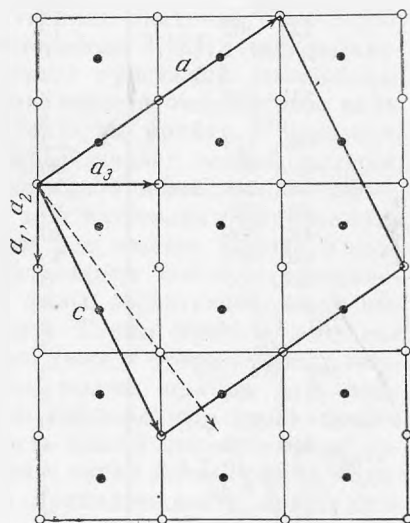


Рис. 1. Схема перехода от кубической ячейки к идеализированной моноклинной ячейке

¹ Моноклинная симметрия высокотемпературной фазы определялась также из анализа соответствующей лауэграммы (Пудовкина, Пятенко, 1964).

Анализ рентгенограммы порошка высокотемпературной фазы алданского цирконолита

<i>hkl</i>	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	Гексагональные индексы	Ромбоэдрические (кубические) индексы
$\bar{1}13$	4	3,37	—	—
311, $\bar{3}12$	3	3,28	—	—
221, 402	100	2,96	2021	$\bar{1}11$, $11\bar{1}$
004	25	2,83	0003	111
223, 402	19	2,53	2022	200, 002
404, 223, $\bar{5}12$	6	2,306	—	—
115, $\bar{3}14$, $\bar{3}15$	3	2,060	—	—
331, $\bar{3}32$	3	2,024	—	—
404	3	1,921	—	—
006, 423	2	1,876	—	—
040, $\bar{6}21$	30	1,817	2240	220, 202
134, $\bar{5}15$, $\bar{3}15$, $\bar{3}16$	3	1,785	—	—
406, 225	25	1,752	2024	220, 022
442, 800	10	1,548	4041	311, 113
623, $\bar{6}25$	15	1,526	2243	$\bar{1}13$, $31\bar{1}$
227, 406	8	1,489	2025	311, 113
442, 804	6	1,473	4042	222, 222
730, 427, 444	2	1,426	—	—
008	2	1,405	0006	222
640, $\bar{6}42$, $\bar{1}53$	2	1,359	—	—
446, 804	6	1,261	4044	400, 004
840, $\bar{1}0.23$, 261	9	1,177	4261	133, $13\bar{3}$, $\bar{3}31$
446, 808	4	1,152	4045	133, $\bar{3}31$
263, $\bar{8}44$, $\bar{1}0.2.1$	4	1,143	4262	420, 402, 204
229, $\bar{4}.0.10$	4	1,125	2027	133, $\bar{3}31$
629, 048	4	1,112	2246	420, 402
$\bar{6}61$, $\bar{1}2.0.2$	4	1,050	6060	422, 224
265, $\bar{1}0.2.7$, 844	4	1,035	4264	422, 422, 224

с Цейлона (Blake, Smith, 1913), причем одновременно делается вывод об их несомненной принадлежности к одному минеральному виду. Сейчас следует дополнительно отметить, что состав цейлонского минерала хорошо укладывается в характерную для цирконолита обобщенную формулу A_4O_7 . Кроме того, соотношение количеств крупных, средних и небольших катионов оказалось весьма близким у обоих рассматриваемых минералов. Поэтому с точки зрения состава действительно не существует никаких противопоказаний для возможности единого структурного типа

Таблица 2

Значения «вертикальной» сферической координаты для некоторых граней кристаллов

Индексы граней	Величины $\rho_{теор}$		«Цирконит» Блейка и Смита ($c/a = 1,165$, $\rho_{эксп}$)	Индексы в ромбоэдрическом аспекте
	кубический кристалл, $c/a = 1,225$	предполагаемый кристалл 1100° -фазы цирконолита, $c/a = 1,161$		
0001	0°00'	0°00'	0°00'	111
10 $\bar{1}2$	35 16	33 50	34 10	110
2023	43 19	41 47	42 25	—
10 $\bar{1}1$	54 44	53 17	53 22	100
2021	70 32	69 33	69 16	111

в случае наших отечественных цирконолитов и минерала Блейка и Смита.

Отсутствие рентгеновских данных для цейлонского минерала в известной мере компенсируется результатами гониометрического измерения кристаллов. Блейк и Смит измерили несколько наиболее совершенных кристаллов призматического габитуса и установили их гексагональную симметрию. В четвертой колонке табл. 2 даны усредненные величины $\rho_{\text{эксп}}$, взятые из работы Блейка и Смита. При сравнении этих величин с теоретическими значениями ρ для нашего предполагаемого кристалла обнаруживается хорошее соответствие. Отметим, что, исходя из величины $\rho(10\bar{1}1) = 53^{\circ}22'$, Блейк и Смит вычислили значение $c/a = 1,165$, очень близкое нашему «рентгеновскому» отношению 1,161. Следует заметить, что Блейк и Смит допускают для своих кристаллов даже более низкую, чем гексагональная, симметрию. Хотя недостаточно высокое качество кристаллов не позволило английским авторам прийти к однозначным результатам, это их предположение представляет особый интерес, так как соответствует нашему выводу об истинной моноклинной симметрии кристаллической фазы, образующейся при нагревании цирконолита.

Все это явилось достаточным основанием для нашего вывода о том, что кристаллы цейлонского минерала представляют собой макровоплощение атомной структуры кристаллической фазы, образующейся при высокотемпературном прокаливании цирконолита. Таким образом, допустив факт единого «дометамиктного» структурного типа у отечественных циркелит-цирконолитов и цейлонского минерала, можно прийти к выводу о восстановлении первоначальной структуры цирконолита, прокаленного при 1100—1200°. Однако если принадлежность нашей высокотемпературной фазы и кристаллов цейлонского минерала к одной полиморфной модификации можно считать доказанной, то в принадлежности кристаллов цирконолита к той же модификации необходимо еще убедиться. С этой целью подробно рассмотрим морфологические особенности разбираемых кристаллов. Отметим, что из-за весьма низкого качества отечественных кристаллов в нашей литературе не приводятся результаты сколько-нибудь полных и надежных гониометрических измерений. Поэтому в качестве хотя бы частичной компенсации этого существенного недостатка рассмотрим такие характеристики, как габитус кристаллов, особенности их двойникования, штриховка граней и т. д.

Обычная форма кристаллов минерала Блейка и Смита — призматическая с удлинением вдоль $[0001]$. Однако в работе этих авторов есть указание о том, что наряду с призматическими наблюдаются также уплощенные по (0001) кристаллы. Последние не могли быть измерены, так как сколько-нибудь удовлетворительные рефлексы были получены лишь от базальной грани (0001) . Для всех кристаллов обоих габитусов весьма характерна штриховка на гранях (2021) , параллельная ребру этой грани с (0001) . Наконец, важно указание на часто встречающиеся двойники с двойниковой плоскостью $(10\bar{1}1)$. В табл. 2, кроме гексагональных индексов только что названных граней цейлонских кристаллов, приведены также индексы этих граней в ромбоэдрическом аспекте. В связи с этим необходимо помнить, что если грани эктаэдра (111) и $(\bar{1}\bar{1}1)$ в случае строго кубической симметрии кристаллографически идентичны, то при гексагональном (ромбоэдрическом) искажении кубической решетки эти грани становятся независимыми во всех отношениях [из табл. 2 следует, что указанные грани имеют гексагональные индексы (0001) и (2021)].

Обращаясь к рассмотрению отечественных кристаллов цирконолита и «циркелита» (Бородин и др., 1960; Булах и др., 1960; Булах, 1963), прежде всего отметим характерную для них форму треугольных и шестиугольных пластинок (рис. 2). Не менее характерна для этих кристаллов

исптрихованность «косых» граней (s), параллельная ребрам этих граней с базисной гранью (c), дающей обычно хорошие оптические рефлексы. В литературе (Булах и др., 1960) отмечаются также весьма типичные сростки двух или более пластинчатых кристаллов, причем при таких сростаниях грань s одного кристалла оказывается параллельной базисной грани c другого.

Несмотря на малую пригодность отечественных циркелит-цирконолитов для гониометрических измерений, А. Г. Булаху (1963) удалось обнаружить кристаллы, на которых можно было провести некоторые частные измерения. Так, для грани s он приводит среднюю величину $\rho(s) = 70^\circ 03'$ при установке $\rho(c) = 0^\circ 00'$. Эта величина представляет собой результат усреднения указанной сферической координаты по нескольким кристаллам.

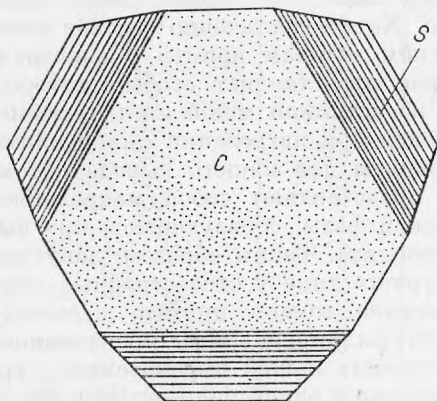


Рис. 2. Схема уплощенного кристалла цирконолита

Однако следует отметить, что измеренные кристаллы были невысокого качества, так как отдельные значения $\rho(s)$ заключены в широких пределах: $67^\circ 15' - 71^\circ 25'$. А. Г. Булах рассматривает пластинчатые кристаллы как уплощенные октаэдры и делает попытку доказать кубическую симметрию измеренных им образцов.

Поэтому, получив величину $\rho(s) = 70^\circ 03'$, близкую к стандартному значению ρ для грани октаэдра ($70^\circ 32'$), А. Г. Булах приходит к выводу о кубической симметрии отечественных циркелит-цирконолитов. Если допустить правильность этого вывода, то за этим сразу следует заключение о том, что отечественные образцы, с одной стороны, и рассмотренный нами минерал Блейка и

Смита — с другой, представляют собой по крайней мере две полиморфные модификации. В таком случае первоначальное предположение Л. С. Бородин (Бородин и др., 1956) о полном родстве цирконолита с цейлонским минералом было бы отвергнуто.

Из нашего анализа, однако, следует, что грань s (рис. 2) может в равной мере представлять собой одноименную грань s (2021) кристаллов Блейка и Смита (см. табл. 2). Как было показано, грань s индексами (2021) — производный эквивалент по отношению к грани октаэдра неискаженной кубической решетки. Величина $\overline{\rho}(s) = 70^\circ 03'$, полученная А. Г. Булахом, заключена между значением $70^\circ 32'$, соответствующим идеальному октаэдру, и теоретической величиной $\rho(2021) = 69^\circ 33'$, вычисленной из полученного нами рентгеновского отношения $c/a = 1,161$. Отсюда следует, что для кристаллов того качества, которые находились в распоряжении А. Г. Булаха, невозможно сделать надежный объективный выбор между истинно кубическим и псевдокубическим кристаллом с гексагональной метрикой, для которой величина $c/a = 1,161$. Наш анализ показал, что между кристаллами цирконолита (циркелита) и цейлонскими образцами могут быть проведены серьезные аналогии. Прежде всего для цирконолита и для минерала Блейка и Смита известны кристаллы уплощенной формы¹. Кроме того, все рассматриваемые кристаллы, в том числе призматического габитуса, имеют

¹ Часто весьма резкая уплощенность кристаллов, даже сама по себе, уже является сильным аргументом в пользу их некубичности.

аналогичные грани, исштрихованные одинаковым образом. С другой стороны, остальные пары аналогичных граней $c(0001)$ весьма гладкие и дают наилучшие оптические рефлексии. Наконец, имеется еще один весьма существенный аргумент, свидетельствующий о некубической симметрии отечественных образцов. В случае кубической симметрии цирконолита грани c и s кристаллов как грани, образующие одну простую форму — октаэдр, должны быть эквивалентными в отношении их свойств. Очевидно, что одно из этих свойств — характер поверхности этих граней. В действительности же наблюдается максимальный контраст: грани c систематически оказываются самыми ровными и блестящими, а грани s наиболее исштрихованы совершенно определенным образом.

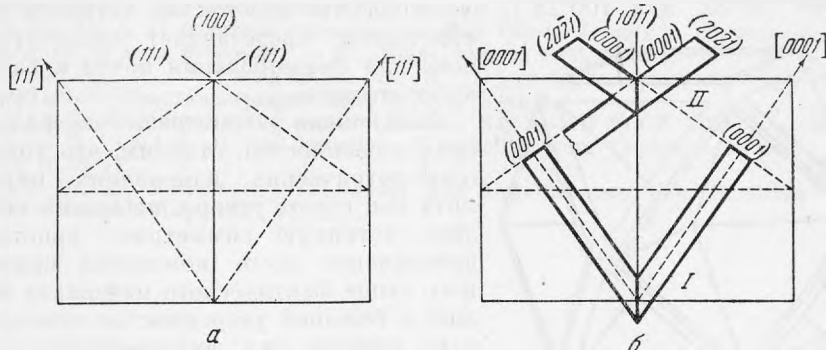


Рис. 3. К интерпретации закономерных срастаний

Рассмотрим теперь характерные срастания. На схеме (рис. 3, а) приведены две кубические ячейки¹, смежные по грани куба (100) и поставленные на ось второго порядка; здесь же показаны индексы необходимых плоскостей и направлений. Напомним, что оси третьего порядка ромбоэдров (кубов) — направления $[111]$ — совпадают с плоскостью чертежа. На рис. 3, б кубическая установка заменена на гексагональную и все кубические индексы преобразованы в соответствующие гексагональные (см. табл. 1). На этом рисунке схема I — закономерный сросток (двойник), образованный двумя призматическими кристаллами Блейка и Смита и нанесенный на остов рис 3, а. Из рис. 3, б следует, что отмечаемая английскими авторами плоскость двойникования (1011) является одновременно плоскостью (100) исходного ромбоэдра (деформированного куба). Это хорошо объясняет тот факт (который, кстати, констатируют Блейк и Смит), что угол между осями шестого порядка сросшихся индивидов весьма близок к стандартной для кубических кристаллов величине $70^{\circ}32'$.

Схема II (рис. 3, б) представляет характерное срастание пластинчатых кристаллов цирконолита. Очевидно, что это образование можно рассматривать также как сросток кристаллов цейлонского минерала, но не удлиненных вдоль $[0001]$, а наоборот, уплощенных по (0001) .

Обращаем внимание на некоторые дополнительные детали. В неоднократно цитированной работе (Булах и др., 1960) угол между гранями (0001) срастающихся пластинок в явном виде не приводится. Однако, как уже упоминалось, авторы отмечают параллельность «косой» грани одного индивидуума базисной грани другого, причем в гексагональной установке величина ρ для этой «косой» грани равна, по А. Г. Булаху

¹ Более строго следовало бы говорить о ромбоэдрах с углом $\alpha = 92^{\circ}$, однако ввиду малых отклонений угла α от 90° для иллюстрации взяты идеально кубические ячейки.

(1963), $70^{\circ}03'$. Из рис. 3 следует, что эта «косая» грань, являющаяся гранью (2021), действительно должна иметь величину ρ , весьма близкую к 70° . Отметим, наконец, что сростки пластинчатых кристаллов могут рассматриваться либо как двойники по (10 $\bar{1}$ 1), либо как закономерное нарастание одного кристалла на другой, при котором с гранью (0001) одного индивида срастается грань (2021) другого: обе эти грани генетически связаны с октаэдрическими плоскостями {111} исходной кубической решетки.

Аналогично объясняется также характерное для цирконолита срастание четырех пластинчатых кристаллов (рис. 4). Так как каждая пара пластинок срастается под углом, близким к идеальному «тетраэдрическому» ($70^{\circ}32'$ или $100^{\circ}28'$), очевидно, что сросток из четверки таких кристаллов представляет скелетную основу для формирования почти идеальных кубооктаэдров.

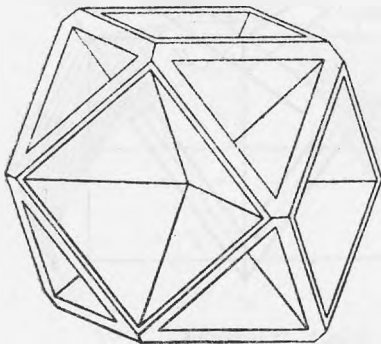


Рис. 4. Перспективный чертеж сложного сростка кристаллов цирконолита (по А. Г. Булаху и др., 1960)

Заканчивая рассмотрение морфологических особенностей, отметим, что хотя при гониометрических измерениях цирконолита мы, строго говоря, не можем определить истинную симметрию кристаллов, привлечение всего комплекса приведенного выше фактического материала позволяет с большой уверенностью констатировать единый тип дометамактовой структуры у отечественных цирконолитов (циркелитов) и минерала Блейка и Смита. Из этого следует, что для рассмотренных образцов выполняется требование единства состава и строения, необходимое и достаточное для отнесения их к одному минеральному виду.

Если подходить к вопросу о названии исследуемого минерала в свете результатов, изложенных в настоящей работе, нельзя не вспомнить, что цейлонский минерал Блейка и Смита фигурирует в одном из самых авторитетных справочников Дэна с соавторами как «минерал без названия». Авторы этого справочника справедливо решили, что Блейк и Смит не имели в свое время достаточных оснований называть свой минерал циркелитом по аналогии со слабо изученным минералом Гуссак и Прайора (Hussak, Prior, 1895). Поэтому, очевидно, что в 1956 г. Л. С. Бородин имел все основания присвоить «минералу без названия» самостоятельное наименование — цирконолит.

Выводы

1. При относительно низких температурах прокаливания (до 800°) отечественных цирконолитов и циркелитов образуется кубическая неупорядоченная метастабильная фаза, не отвечающая первоначальной структуре минералов.

2. При высоких температурах ($1100-1200^{\circ}$) восстанавливается первоначальная дометамактовая структура изученного минерала — производное от типа $\text{CaF}_2-\text{CeO}_2$. Истинная симметрия структуры — моноклиная, но с четко выраженной псевдогексагональностью.

3. Описанные в нашей литературе «цирконолиты» и «циркелиты», а также «разновидность циркелита с Цейлона» представляют собой один минеральный вид.

4. Предпочтительное название этого вида — цирконолит.

ЛИТЕРАТУРА

- Бородин Л. С., Назаренко И. И., Рихтер Т. Л. О новом минерале цирконолите — сложном окисле AB_3O_7 . — Докл. АН СССР, 1956, 110, № 5.
- Бородин Л. С., Быкова А. В., Капитанова Т. А., Пятенко Ю. А. Новые данные о цирконолите и его ниобиевой разновидности. — Докл. АН СССР, 1960, 134, № 5.
- Булах А. Г., Ильинский Г. А., Кухаренко А. А. Циркелит из месторождений Кольского полуострова. — Записки Всес. мин. об-ва, 1960, ч. 89, вып. 3.
- Булах А. Г. О циркелите и цирконолите из карбонатитов Кольского полуострова. — Записки Всес. мин. об-ва, 1963, ч. 92, вып. 6.
- Пудовкина З. В., Пятенко Ю. А. Рентгенографическое исследование цирконолита и его синтетического аналога. — Сб. «Рентгенография минерального сырья», вып. 4. Изд-во «Недра», 1964.
- Пятенко Ю. А. О некоторых количественных соотношениях в структурах, производных от типа флюорита. — Ж. структ. химии, 1963, 4, № 5.
- Пятенко Ю. А., Пудовкина З. В. О метрике решетки кристаллов $CaZrTi_2O_7$. — Кристаллография, 1964, 9, № 1, 98—100.
- Семенов Е. И. Минералогия редких земель. Изд-во АН СССР, 1963, стр. 56.
- Blake G. S., Smith H. On varieties of zirkelite from Ceylon. — Mineral. Mag., 1913, 16, N 77.
- Hussak Dr. E., Prior G. T. Lewisite and zirkelite, two new Brazilian minerals. — Mineral. Mag., 1895, 11, 86.