

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Геологический факультет

Кафедра кристаллографии и кристаллохимии

Курсовая работа

НА ТЕМУ:

**«ДВОЙНИКИ КРИСТАЛЛОВ СТАВРОЛИТА.
ОПИСАНИЕ НА МАКРО И МИКРОУРОВНЕ»**

**Выполнил: студентка 105 группы
Микляева Е.П.**

**Научный руководитель: к.г.-м.н., н. с.
Аксенов С.М.**

Москва 2013

Содержание

Введение.....	3
1. Симметрия идеальных и реальных форм кристаллов.....	3
2. Понятие «сросток минеральных индивидов».....	7
3. Симметрия и морфология двойников.....	7
<i>Определение термина «двойник».....</i>	8
<i>Классификация двойников.....</i>	9
4. Общая характеристика ставролита.....	10
5. Кристаллическая структура ставролита.....	12
6. Рост двойников кристаллов.....	13
7. Законы двойникования ставролита.....	17
Заключение.....	24
Список используемой литературы.....	25

Введение

В этой работе рассмотрены законы двойникования кристаллов на примере ставролита, были построены модели двойников, проведён обзор литературы, посвящённой росту двойников кристаллов, выводу законов двойникования.

1. Симметрия идеальных и реальных форм кристаллов

Симметрия идеальных кристаллов описывается 32 классами (табл. 1). В первом столбце в скобках указан порядок класса. Если число неэквивалентных ориентировок этих подгрупп больше единицы, то оно отмечено в скобках.

Таблица 1. Классы симметрии и их нетривиальные подгруппы

Класс симметрии	Нетривиальные подгруппы
$1^{(1)}$	
$\bar{1}^{(2)}$	
$m^{(2)}$	
$2^{(2)}$	
$2/m^{(4)}$	$2, m, \bar{1}$
$222^{(4)}$	$2 (3)$
$2mm^{(4)}$	$2, m (2)$
$mmm^{(8)}$	$222, 2mm (3), 2/m (3), 2 (3), m (3), \bar{1}$
$3^{(3)}$	
$\bar{3}^{(6)}$	$3, \bar{1}$
$3m^{(6)}$	$3, m$
$32^{(6)}$	$3, 2$
$\bar{3}m^{(12)}$	$32, 3m, \bar{3}, 3, 2/m, 2, m, \bar{1}$
$4^{(4)}$	2
$4/m^{(8)}$	$4, \bar{4}, 2/m, 2, m, \bar{1}$
$4mm^{(8)}$	$4, 2mm (2), 2, m (2)$
$422^{(8)}$	$4, 222 (2), 2 (3)$

$4/mmm$ ⁽¹⁶⁾	422, 4mm, $\bar{4}2m$ (2), 4/m, mmm (2), 4, $\bar{4}$, 222 (2), 2mm (3), 2/m (3), 2 (3), m (3), $\bar{1}$
$\bar{4}2m$ ⁽⁸⁾	$\bar{4}$, 222, 2mm, 2 (2), m
$\bar{4}$ ⁽⁴⁾	2
6 ⁽⁶⁾	3, 2
6/m ⁽¹²⁾	6, $\bar{6}$, 3, 2/m, 3, 2, $\bar{1}$
6mm ⁽¹²⁾	6, 3m (2), 2mm, 3, 2, m (2)
622 ⁽¹²⁾	6, 32 (2), 222, 3, 2 (3)
6/mmm ⁽²⁴⁾	622, 6mm, $\bar{6}2m$ (2), 6/m, $\bar{3}m$ (2), mmm, 6, $\bar{6}$, 32 (2), 3m (2), 3m (2), $\bar{3}$, 222, 2mm (3), 2/m, 3, 2 (3), m (3), $\bar{1}$
$\bar{6}$ ⁽⁶⁾	3, m
$\bar{6}2m$ ⁽¹²⁾	$\bar{6}$, 32, 3m, 2mm, 3, 2, m (2)
23 ⁽¹²⁾	222, 3, 2
$m\bar{3}$ ⁽²⁴⁾	23, mmm, $\bar{3}$, 222, 2mm, 2/m, 3, 2, m, $\bar{1}$
$\bar{4}3m$ ⁽²⁴⁾	23, $\bar{4}2m$, 3m, $\bar{4}$, 222, 2mm, 3, 2, m
432 ⁽²⁴⁾	23, 422, 32, 4, 222(2), 3, 2(2)
$m\bar{3}m$ ⁽⁴⁸⁾	432, $\bar{4}3m$, $m\bar{3}$, 4/mmm, 23, $\bar{3}m$, 422, $\bar{4}2m$ (2), 4mm, 4/m, mmm (2), 32, 3m, $\bar{3}$, 4, $\bar{4}$, 222 (2), 2mm (2), 2/m (2), 3, 2 (2), m (2), $\bar{1}$

Грани кристаллов по симметрии могут отвечать 10 плоским односторонним (пирамидальным) группам: 1, 2, 3, 4, 6m, 2mm, 3m, 4mm, 6mm. Симметрия ребер кристаллов описывается четырьмя группами, дающими с учетом ориентировки элементов симметрии относительно ребра, пять случаев: 1, 2, m, $\perp m$ и 2mm. Симметрия вершин кристаллов, так же как и граней, описывается 10 пирамидальными группами. Симметрия двусторонних плоскостей описывается 20 группами (27 некубических минус 7 пирамидальных), дающими 21 случай с учетом ориентировки элементов симметрии относительно плоскости (в записи группы на первом месте указан элемент симметрии, совпадающий с нормалью к плоскости): $\bar{1}$, 12, 1m, m/2, 2/m, mm2, 222, mmm, $\bar{3}$, 6/m, 622, 6/mmm, $\bar{6}$, $\bar{6}2m$, 4/m, 422, 4/mmm, $\bar{4}$, $\bar{4}2m$. Симметрия направлений в кристаллах описывается 27 некубическими классами, дающими с учетом ориентировки класса относительно направления 31 случай (21 случай для двусторонних плоскостей плюс 10 случаев односторонних

плоскостей), т. е. симметрией пинакоидов и моноэдров. Симметрия направлений, лежащих в двусторонних плоскостях, описывается семью группами низшей категории, дающими также с учетом ориентировки 11 случаев (в записи группы на первом месте указан элемент симметрии, нормальный к плоскости, на втором — параллельный плоскости и направлению, на третьем — ось симметрии 2, перпендикулярная к направлению и лежащая в плоскости): $\bar{1}$, 12, 112, 1*m*, 2/*m*, 12/*m*, 112/*m*, *m*2*m*, 1*m*2*m*, 222 и *mmm*. Число направлений, вдоль которых проходят оси выше второго порядка, равно 19. Они указаны в группах симметрии односторонних и двусторонних плоскостей.

Для наглядности представления классов симметрии кристаллов, групп симметрии плоскостей и направлений могут быть использованы различные модели и проекции. На рис. 1 показаны 32 класса симметрии при помощи параллелепипедов, формы которых отвечают элементарным ячейкам кристаллов. Стрелки отображают симметрию граней, ребер и вершин этих фигур. Раскрашивая треугольники на концах стрелок, можно отобразить одноцветную и многоцветную симметрию этих многогранников, что на некоторых примерах показано на этом же рисунке.

Известно, насколько трудно однозначно определить точечный класс симметрии кристалла. Примером в этом отношении является бихромат калия, тщательно исследованный А.В.Шубниковым. Для этого вещества до сих пор неизвестно, имеет ли он центр симметрии или принадлежит к моноэдрическому классу триклинной сингонии. Пространственные группы для ряда минералов также окончательно не установлены. Форма кристалла, даже почти идеальная, является, пожалуй, самым ненадежным критерием для определения класса симметрии. Ямки травления также нередко вводят в заблуждение исследователей из-за несоответствия их формы симметрии граней кристалла.

Наличие в огранении кристалла форм общего положения не всегда может служить достаточным обоснованием для установления класса симметрии. Дело в том, что в классах, содержащих плоскости и центр симметрии, по причинам правизны или левизны кристаллообразующей среды половина граней форм общего положения либо может совсем не проявиться, либо будет слабо развита. Профессор В.И. Михеев любил показывать кристалл берилла (класс *6/mmm*) со штриховкой, расположенной косо к ребрам гексагональной призмы. Десимметризация внешней формы этого кристалла ставила в тупик специалистов, знающих симметрию кристаллов минералов. Чем более тонкими методами исследуются реальные кристаллы, тем ниже может оказаться их симметрия. Наиболее близкими к

идеальным могут быть кристаллы, полученные из очень чистых материалов (например полупроводники) в условиях, максимально исключающих искажения структуры.

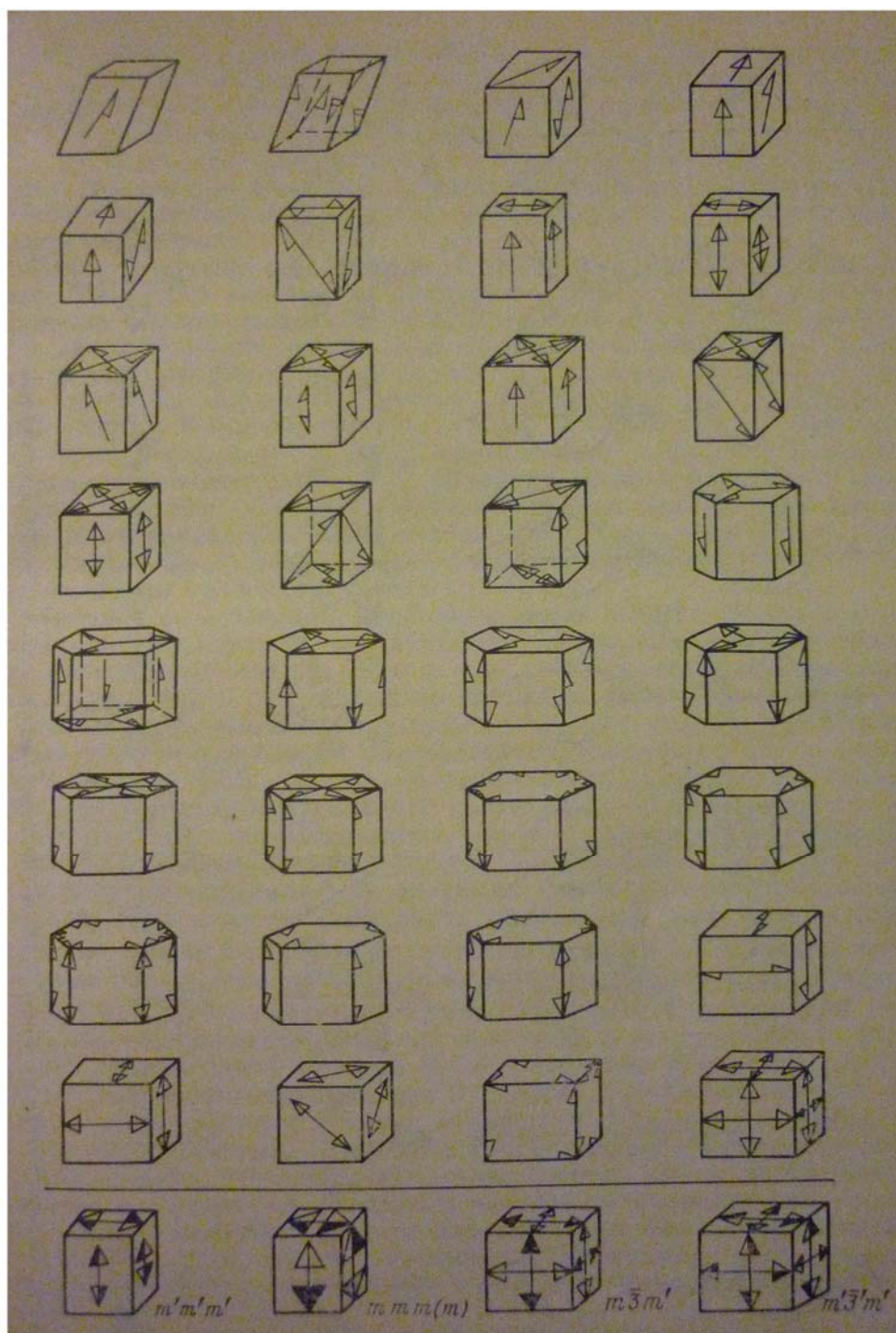


Рис. 1 Классы симметрии

При изучении симметрии формы реального кристалла необходимо учитывать две возможности её изменения. Первое — понижение симметрии до всех возможных подгрупп точечного класса (заниженная симметрия) и второе — повышение симметрии формы, которое может быть описано надгруппами точечного класса, включая предельные группы (завышенная симметрия).

Сказанное о симметрии реального кристалла относится к граням и направлениям, видимая симметрия которых подчиняется той же схеме. Ребра реального кристалла могут изменить свою идеальную симметрию только в пределах пяти групп симметрии ребер. Направления, лежащие в односторонних и двусторонних плоскостях, могут изменить свою симметрию только в пределах 16 групп — 5 групп симметрии ребер плюс 11 групп симметрии направлений в двусторонних плоскостях.

2. Понятие «сросток минеральных индивидов»

При изучении геологических образований исследователь в первую очередь сталкивается со сростками, а не с отдельными индивидами минералов. Кристаллические сростки являются промежуточной областью между кристаллическими индивидами и средами. Отличительные свойства индивидов и сред по А.В. Шубникову: идеальный индивид конечен, неделим без нарушения целостности, неоднороден и имеет определенную форму; идеальная среда бесконечна, делима, однородна и не имеет формы. Между реальными индивидами и средами существуют бесконечные переходы, и понятие «сросток минеральных индивидов» ещё не сформировано окончательно.

Е.П. Макогонов отличает сростки от минеральных индивидов, если можно выделить, по крайней мере, два индивида, агрегаты от сростков – как только можно выделить трансляционные компоненты в трех некомпланарных направлениях, т. е. установить признаки сред. Индивиды в сростке должны быть связаны, иметь общую поверхность или область перекрытия, обеспечивающую сцепление индивидов между собой, т. е. иметь общую границу.

3. Симметрия и морфология двойников

Двойникование кристаллов представляет собой широко распространенное явление в мире минералов и среди кристаллов искусственных соединений.

Двойники кристаллов минералов исследуются петрографами и минералогами и играют определенную роль при описании горных пород и минералов. Установление генезиса двойников может оказать значительную пользу при расшифровке условий образования месторождений. К сожалению, происхождение большинства природных двойников остается до настоящего времени загадкой и при их описании авторы вынуждены довольствоваться только констатацией того или иного двойникового закона. Нисколько не лучше обстоит дело с двойниками, которые встречаются при выращивании искусственных кристаллов. В ряде случаев двойникование представляется явлением нежелательным, препятствующим получению монокристаллов. Чтобы устранить это препятствие, необходимо знать причины возникновения двойников и их развития при росте. Для создания некоторых приборов могут потребоваться кристаллические материалы, содержащие двойниковые границы определенного типа. Все это говорит о важности изучения двойников.

Теоретический вывод возможных двойников для каждого класса симметрии кристаллов имеет значение по той причине, что многие двойниковые срастания часто остаются при исследовании незамеченными.



Рис. 2. Двойники кристаллов кварца и магнетита.

Определение термина «двойник»

Двойником называют сросток двух или нескольких кристаллов одного и того же вещества по определенным законам симметрии. Для кристаллов, образующих двойник обязательным условием является совпадение двух одноименных

плоскостей, причем одноименные ряды, лежащие в этих плоскостях, также совпадают (параллельны). При таком совпадении плоскостей и рядов образуется обязательно новая плоская группа симметрии, являющаяся надгруппой (вдвое большего порядка) исходной односторонней плоской группы. Но и при несовпадении одноименных рядов, лежащих в параллельных одноименных плоскостях, также могут возникать плоские группы симметрии (односторонние и двусторонние), представляющие собой как бы границы кручения. Компоненты двойника могут быть совмещены друг с другом при помощи операций $\bar{1}$, m , 2 , 4 , $\bar{4}$, 6 , $\bar{6}$.

Если определение термина «двойник» не ограничивать областью кристаллических двойников, то можно дать ему следующую формулировку: двойником называется такой сросток двух одинаковых компонентов, группа симметрии которого является надгруппой индекса 2 подгрупп класса симметрии компонентов. Из этого следует, что для вывода групп симметрии двойников знание симметрии границы срастания не обязательно.

Классификация двойников

Различают двойники I рода (отражения), в которых один индивид может быть выведен из другого путем отражения в некоторой плоскости и двойники II рода (вращения) в которых один двойник выводится из другого поворотом вокруг некоторой оси. По облику различают двойники срастания и прорастания. По способу образования двойники делятся на ростовые и механические. Также некоторые авторы выделяют двойники фазовых превращений.

Двойникование всегда сопровождается поворотом решетки. Скольжение может принимать участие в процессе двойникования в качестве составляющей части, но поворот решетки обязателен. Таким образом, при двойниковании кристаллическая структура компонентов двойника сохраняется, а изменяется лишь их форма и взаимная ориентировка.

Каждая двухцветная группа симметрии двойника содержит одноцветную подгруппу симметрии вдвое меньшего порядка. Элементы симметрии этих подгрупп являются общими для обоих компонентов двойника и образуют подгруппу класса симметрии кристаллов, образующих двойник. Если компоненты двойника имеют только одну общую одноцветную ось симметрии, то вращение кристаллов вокруг этой оси на произвольный угол может не изменить группы симметрии двойника. Это

дает основание разделить двойники на два типа: жесткие и нежесткие. Жесткими двойниками называют такие, которые при вращении одного компонента относительно другого вокруг любого направления на произвольный угол изменяют двойниковую группу или превращаются в недвойниковые сростки. Нежесткие двойники допускают вращение одного компонента относительно другого вокруг определенных направлений без изменения двойниковой группы симметрии.

Нежесткие двойники должны содержать такие одноцветные подгруппы, ориентировка которых определяется одним направлением в кристалле или вообще не связана ни с каким направлением. К последним относятся только две одноцветные группы симметрии 1 и $\bar{1}$. Если нежесткая подгруппа входит в состав двойниковой группы, содержащей $\bar{1}$, то двойник становится жестким. Это произойдет и в том случае, когда к нежесткой осевой подгруппе добавляется перпендикулярная плоскость m' . Помимо того, жесткими надгруппами будут ещё и те, для образования которых необходим поворот кристалла с нежесткой подгруппой на определенный угол (90 или 60^0). Всего имеется 40 жестких кристаллографических групп симметрии двойников и 18 нежестких. Последние можно разделить на «полужесткие» и «мягкие». Такое дополнительное деление вытекает из элементарных теорем кристаллографии, показывающих, что при повороте фигуры вокруг нормали к её четной оси симметрии на произвольный малый угол она займет новое положение, связанное с исходным осью второго порядка, проходящей по биссектрисе угла поворота. Если же поворот фигуры осуществляется вокруг направления, проходящего вдоль плоскости симметрии, то новое положение её будет связано с исходным новой плоскостью симметрии, проходящей по биссектрисе угла поворота.

Ярким примером кристаллических двойников является минерал ставролит, который мы рассмотрим подробнее.

4. Общая характеристика ставролита

Ставролит – минерал из класса силикатов, основной силикат алюминия и железа с дополнительными анионами. Название минералу дал в 1792 году французский ученый Ж. К. Деламетри. Название происходит от греч. «ставрос» – крест по форме часто встречающихся крестообразных двойников.

Химический состав $Fe^{2+}Al_4[SiO_4]_2O_2[OH]_2$ или $Fe[OH]_2 \cdot 2Al_2SiO_5$ (FeO – 15,8%, Al_2O_3 – 55,9%, SiO_2 – 26,3%, H_2O – 2,0%). Часты примеси Co, Ni (разновидность люсакит) и Mn (разновидность нордмаркит). По структуре кристаллической решетки

относится к типу силикатов с изолированными тетраэдрическими группами $[\text{SiO}_4]^{4-}$ соединяющимися через катионы (Fe^{2+} и Al^{3+}) находящиеся в четверной и шестерной координации; избыточные валентности компенсируются добавочными анионами O^{2-} и $(\text{OH})^-$.

Цвет ставролита красновато-бурый, коричневый, желтовато-бурый, темно-красный, темно-бурый до черного. Разновидность люсакит имеет темно-синий цвет. Встречается обычно в виде одиночных хорошо образованных короткопризматических и таблитчатых кристаллов. Иногда встречаются кристаллы псевдогексагонально-призматического облика. Характерными для этого минерала являются двойники в виде косого (под углом 60°) или прямого (под углом 90°) креста. Ставролит изредка образует «тройники» в виде шестилучевых звезд и более редкие типы закономерных сростков. Реже ставролит встречается в виде отдельных неправильных зерен. Твердость 7-7,5. Плотность 3,65-3,8 (колеблется в зависимости от включений посторонних минералов). Хрупкий. Спайность совершенная. Блеск стеклянный, матовый, смоляной. Излом неровный, раковистый. Непрозрачный, просвечивающий, полупрозрачный. Очень редко встречаются прозрачные кристаллы. В кислотах не растворим.

Согласно классическим представлениям кристаллы ставролита ромбической сингонии, ромбо-дипирамидальный класс. Пр. Группа *C 2mm*. Обычно имеют вид коротких толстых призм. Преимущественно встречающиеся формы: призмы $\{110\}$ и пинакоиды $\{001\}$ и $\{010\}$. Характерные двойники напоминают крест, прямоугольный — по (032) или косой — по (232).

Однако согласно новейшим исследованиям сингония ставролита описывается как моноклиная, моноклинно-призматический класс симметрии $2/m$.

Ставролит имеет метаморфическое происхождение и является типичным минералом гнейсов и кристаллических сланцев, образовавшихся при региональном, реже контактовом, метаморфизме осадочных толщ, богатых железом и алюминием. Этот минерал образуется при довольно высоких давлениях и относительно низких температурах и выступает в роли индикатора амфиболитовой фации регионального метаморфизма. Ставролит магматического происхождения изредка встречается в гранитах. В условиях выветривания устойчив, иногда замещается каолином. Распространен в россыпях и обломочной фракции осадочных пород. При ретроградном метаморфизме переходит в биотит и хлоритоид, при прогрессивном — в кордиерит или гранат.

Находки ставролита известны практически во всех странах, где развиты толщи метаморфических пород. Ставролит встречается в США, Бразилии, Франции, Швейцарии, Болгарии, Австрии, на Мадагаскаре. Однако в количестве, достаточном для промышленных масштабов добычи, кристаллы-двойники ставролита находятся только в США, на восточном побережье. В России этот минерал встречается во многих регионах, но наиболее известно месторождение Кейвы на Кольском полуострове, где он встречается в слюдяных, кварцево-сланцевых и кианит-мусковит-ставролитовых сланцах. Это месторождение – источник лучших в мире образцов ставролита в светлом слюдистом сланце. На Южном Урале встречается в сланцах горы Таганай, а также в россыпях по рекам Санарке и Каменке (Кочкарский район). Отмечен также в районе оз. Байкал и в других местах. Прозрачные разновидности ставролита – редкий ювелирный камень. Находки Zn-ставролита служат поисковым признаком на колчеданно-полиметаллические месторождения. Также образцы ставролита находят в Карелии (Хит-остров) и в Сибири (район Мамских слюдяных месторождений).

Практического значения этот минерал не имеет. Его используют как мягкий абразивный материал для полировки поверхностей. Научный интерес он представляет для геологов и минералогов, как индикатор температуры и давления при образовании метаморфических пород. Крестообразные двойники, тройники и прочие эффектные образцы ставролита высоко ценятся коллекционерами; его применяют в качестве амулетов и талисманов, используют как поделочный камень.

5. Кристаллическая структура ставролита

Структура моноклинная (псевдоромбическая). Представляет собой упорядоченное чередование в направлении оси b (в пределах кубической плотнейшей упаковки атомов O) слоёв кианитовой структуры — цепочек из AlO_6 -октаэдров, соединенных друг с другом одиночными SiO_4 — тетраэдрами и AlO_6 -октаэдрами, и слоёв $AlFe_2O_3(OH)$, построенных из соединенных вершинами FeO_4 -тетраэдров и AlO_6 -октаэдров. В слоях $AlFe_2O_3(OH)$ имеются дополнительные октаэдрические положения, занятые преимущественно Fe и Mg и имеющие общие грани с FeO_4 -тетраэдрами. Распределение изоморфных атомов (Al, Mg, Fe), (Fe, Mg, Al), (Si, Al) по соответствующим структурным положениям упорядочено. Именно из-за распределения катионов симметрия структуры при ортогональной ячейке понижается до моноклинной.

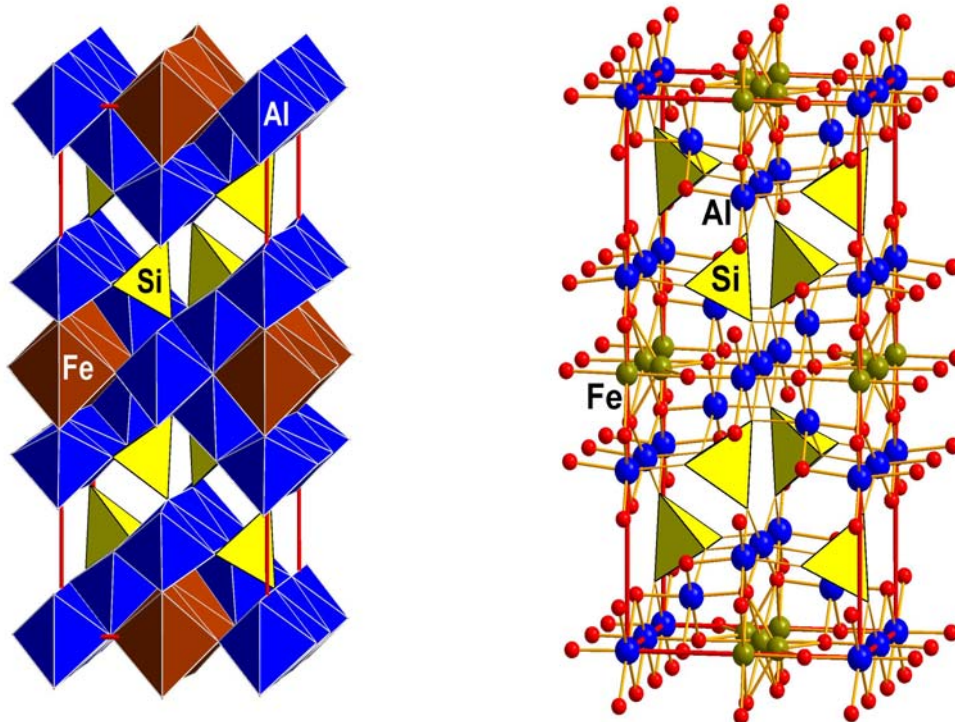


Рис. 3 Структура ставролита

Наиболее развиты формы: (110) $\varphi(64^\circ 44')$ $\rho(0^\circ 00')$, (010) $\varphi(0^\circ 00')$ $\rho(90^\circ 00')$, (001) $\varphi(-)$ $\rho(0^\circ 00')$, менее развиты (201) $\varphi(90^\circ 00')$ $\rho(55^\circ 14')$, редки (100) $\varphi(90^\circ 00')$ $\rho(90^\circ 00')$, (021) $\varphi(0^\circ 00')$ $\rho(34^\circ 13')$ и (041) $\varphi(0^\circ 00')$ $\rho(53^\circ 40')$.

Для ставролита из гнейсов Среднего Приазовья намечается связь между обликом кристаллов и их ориентировкой по отношению к сланцеватости пород: если оси c и b лежат в плоскости сланцеватости, облик кристаллов ромбического развития, при расположении оси c параллельно и оси b перпендикулярно сланцеватости кристаллы псевдогексагонально-призматические.

Ставролит образует закономерные сростания с кианитом, что объясняется сходством в расположении атомов соответствующих плоских сеток. В таких сростаниях (010) ставролита параллельна (100) кианита.

6. Рост двойников кристаллов

Различают двойники I рода (отражения), в которых один индивид может быть выведен из другого путем отражения в некоторой плоскости и двойники II рода (вращения) в которых один двойник выводится из другого поворотом вокруг некоторой оси. По облику различают двойники сростания и прорастания.

Вывод законов двойникования проводился на основании правил Фриделя, согласно которым в двойниках I рода двойниковая плоскость должна быть параллельна определенной кристаллографической сетке обоих кристаллов, а в двойниках II рода двойниковая ось должна быть параллельна определенному ряду узлов решеток обоих кристаллов. Общее число теоретически возможных законов двойникования оказалось равным 1021. На рисунке 4 приведена плоскость двойникования ставролита (231).

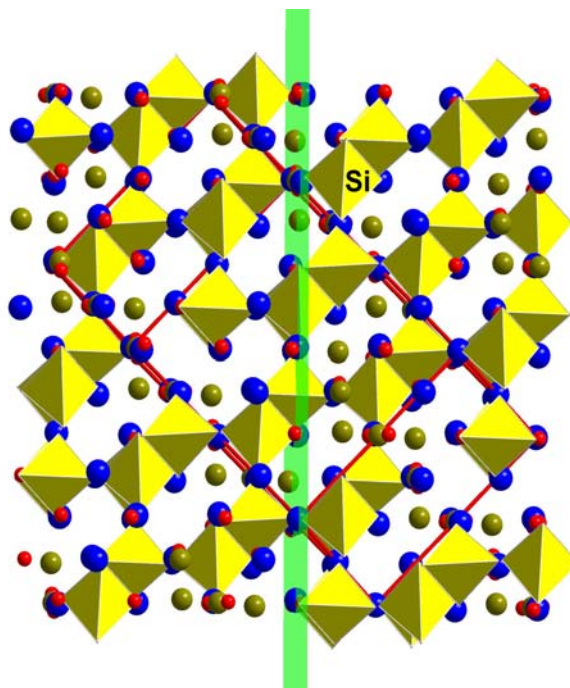


Рис. 4 Плоскость двойникования ставролита (231)

Зарождение будущего двойникового сростка является случайным событием в ходе нормального роста кристаллов.

На определенной стадии роста кристалла к его грани присоединяется зародыш (кластер) не в нормальном, а в двойниковом положении. Плоскость, на которой происходит появление зародыша, называют плоскостью первоначального срастания (ППС). Ошибки при росте кристаллов, приводящие к появлению зародыша в двойниковом положении, происходят чаще всего при увеличении пересыщения. Появление двойников часто происходит на самой ранней стадии роста: на стадии зародышеобразования. Экспериментальные исследования первых стадий зарождения двойников показали, что большинство осаждаемых кристалликов закрепляется на подложке в нормальном положении, очень небольшая часть в случайном и значительное число в двойниковом положении. Близость числа

зародышей в нормальном и двойниковом положении объясняется тем, что свободная энергия образования сростков первого типа лишь незначительно превышает энергию образования нормальных сростков. Степень различия энергии образования сростков двух различных типов зависит от типа соединения, закона двойникового срастания и других факторов. Степень различия будет тем меньше, чем меньше степень искажения структуры кристаллов на границе срастания. Границы между двойникующимися структурами могут иметь когерентный и частично когерентный характер. Ближайшие к границе первые сетки индивидов претерпевают определенную гомогенную деформацию, которая приводит к образованию дислокаций как полных, так и частичных. Когерентная граница двойника не сопровождается появлением деформаций, а соответственно и дислокаций. Сростки индивидов с частично когерентным характером границ, но отличающихся от двойниковых отсутствием кристаллографических симметричных законов срастания принято называть аутотаксическими.

Двойникование может осуществляться за счет взаимодействия кристаллического зародыша с так называемой двойникующей фазой, имеющей структуру, отличную от структуры образующегося двойникового индивида. Образование двойников в этом случае происходит за счет выделения на ранних стадиях кристаллизации метастабильной фазы данного вещества, служащей затравкой для последующего нарастания на неё с двух сторон кристаллов стабильной фазы. Структура переходного слоя — двойникующей фазы — может быть аналогична структуре какой-либо полиморфной модификации данного вещества. Элементы симметрии для таких двойниковых сростков присущи двойникующим полиморфным модификациям и, наоборот, не характерны для монокристаллов основного вещества.

Возникает вопрос: почему при появлении двойникового зародыша в одном случае образуются двойники срастания, в другом — двойники прорастания. По мнению Р.Кана, двойники срастания наиболее характерны, если граница срастания имеет когерентный характер, а прорастания характерны для кристаллов с частично когерентной границей срастания. Но это не всегда так. Кристаллы одного и того же вещества могут образовывать как двойники срастания, так и прорастания по одному и тому же закону.

Р.Керн объясняет образование двойников срастания тем, что зарождение двойникового индивида происходит на плоскости, которая не является плоскостью симметрии двойника, ППС исчезает при росте. Не оспаривая предложенным

Р.Керном механизма образования двойников прорастания, М.Сенешаль указала на большую вероятность зарождения двойникового индивида на иных ППС по сравнению с таковыми в работе Р.Керна. Так, для минералов, образующих двойники по флюоритовому закону, более вероятным является образование двойникового зародыша не на относительно редкой для этих структур форме {110}, а на гранях {111}. Вслед за этим кристалл постепенно менял свой габитус с октаэдрического на кубический, что и приводило к образованию двойников прорастания. Относительная частота двойников срастания и прорастания, вероятно, является функцией нестабильности кристаллического габитуса.

Согласно представлениям Н.Н. Шефталя, первоначальный сросток индивидов перерождается в двойник прорастания путем постепенного взаимного обрастания двух сдвойникованных индивидов при выравнивании размеров граней кристалла-подложки и двойникового зародыша. Однако эта теория образования двойников прорастания вызывает некоторые сомнения.

Влияние некоторых примесей способствует образованию двойников прорастания. Эффективность их воздействия на частоту появления двойников тем выше, чем ближе радиус иона примеси к иону основного вещества. Р.Керн показал, что примеси облегчают двойникование кристаллов путем уменьшения энергии границы двойника.

Существует и другая гипотеза образования двойников за счет слипания кластеров в двойниковом положении на стадии зародышеобразования. Границы индивидов в этом случае должны иметь ступенчатый характер, так как для границы двойника прорастания пирита, например, было установлено, что граница двойника имеет очень сложный характер и состоит из ступеней разного размера.

Большой накопленный эмпирический материал свидетельствует о необычайной склонности одних веществ образовывать двойники, как, например, ставролит, перовскит, киноварь, тогда как другие соединения могут совсем не давать двойники или же лишь в редких случаях. Двойники, столь характерные для какого-либо минерала могут вообще не встречаться у другого изоструктурного с ним вещества. Чаще всего соединения с идентичной структурой имеют одинаковые типы двойников, но из этой закономерности имеется немало исключений. Эти на первый взгляд парадоксальные несоответствия, очевидно, объясняются различием характера связей этих соединений. Численная оценка сил химической связи элементов в структуре очень сложна, в связи с чем предсказание двойникования минералов в настоящее время затруднительно.

Наблюдается общая тенденция в мире кристаллических веществ: чем ниже симметрия кристалла, тем в общем больше вероятность образования у него двойников и тем больше разнообразия будет наблюдаться в законах его двойникования.

7. Законы двойникования ставролита

Для ставролита характерны законы двойникования $2'/m'$ по (231) и $mm'm'$ по (031). В первом случае сросшиеся индивиды ставролита образуют крест (рис.5). Подобный крест можно получить еще двумя способами: поворотом одного индивида относительно другого вокруг оси [130] на 120° , а также поворотом одного индивида относительно другого вокруг оси [101] на 120° .

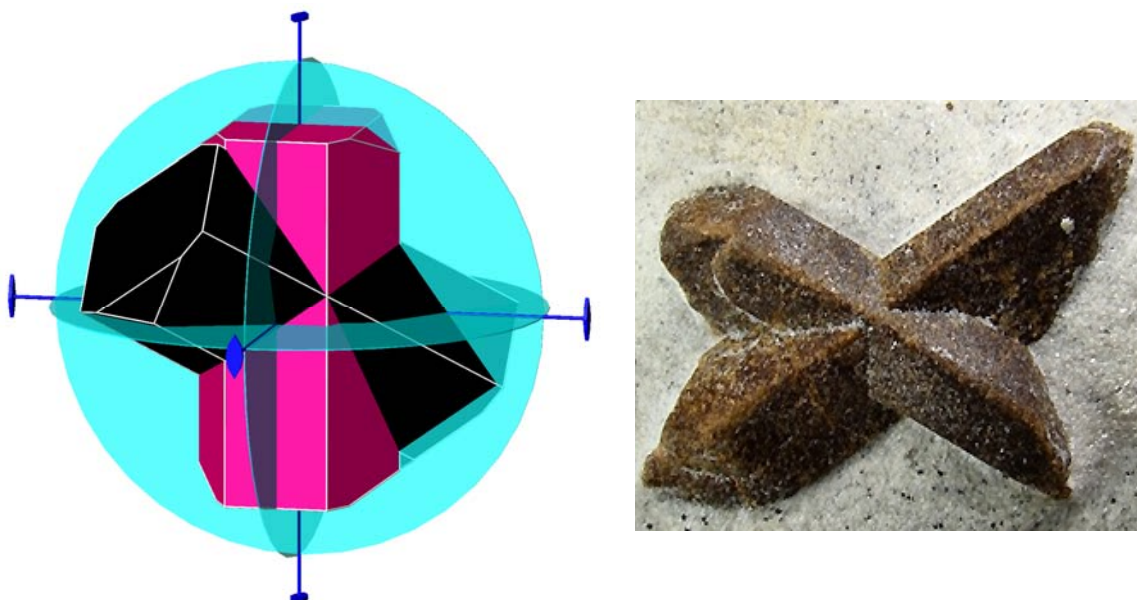


Рис. 5. Двойник ставролита по плоскости (231) идеальный и реальный

В перечисленных вариантах углы между соответствующими осями очень близки друг к другу. Этот результат хорошо согласуется известными правилами: если два индивида сростка неэнантиоморфны и эквивалентны, то двойниковая плоскость проявляется в сростке при повороте одного индивида относительно другого на любой угол вокруг оси, лежащей в плоскости симметрии исходного индивида. Двойниковая ось появляется при повороте одного индивида относительно другого вокруг направления, перпендикулярного оси четного порядка, на любой угол. Ось [130] лежит в плоскости симметрии (001) и перпендикулярна оси второго порядка [001], а ось [101] лежит в плоскости симметрии (010) и перпендикулярна оси второго порядка [010].

В двойнике по плоскости (031), судя по группе симметрии $mm'm'$, должны быть две плоскости двойникования. Одна из них имеет символ (031) и полярные координаты $\rho=45^{\circ}34'$ и $\varphi = 0^{\circ}$. Вторая плоскость двойникования должна иметь иррациональный символ и полярные координаты $\rho=44^{\circ}26'$ и $\varphi = 0^{\circ}$. Соответственно этому в двойниках по (031) угол между осями индивидов, отличается от прямого на $1^{\circ}08'$ (рис.6). Близкие угловые соотношения можно получить при повороте одного индивида относительно другого вокруг оси [100] на 90° . В этом случае углы между осями с разных индивидов равны 90° , а группа симметрии двойника $4'/mmm'$. В виду чрезвычайной близости двойника по (031) к этой группе симметрии в дальнейшем закон двойникования записывают как $4'/mmm'$ по [100].

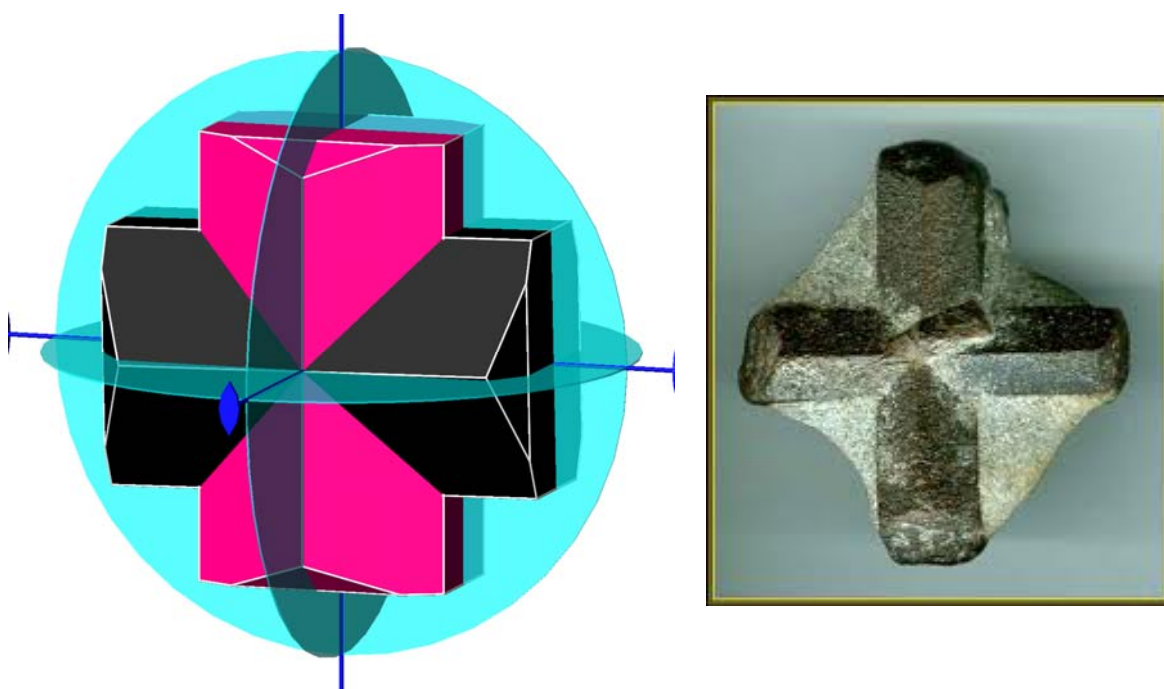


Рис. 6. Двойник ставролита по плоскости (031) идеальный и реальный

Основываясь на законах двойникования по (231) и (031), можно вывести другие типы сростков.

Если к одному из индивидов «приложить» два других, связанных с первыми двойниковыми плоскостями $(2\bar{3}1)$ и $(\bar{2}31)$, то углы между осями с второго и третьего индивидов будут равны $61^{\circ}52'$, углы между осями в индивидов равны $59^{\circ}26'$ и между осями а, соответственно $88^{\circ}52'$, т.е. очень близкими к углам между соответствующими осями двойника по (231).

Подобный сросток можно получить поворотом одного индивида относительно другого на 120° вокруг оси [130] и третьего индивида относительно

первого поворотом вокруг той же оси на 240° . В результате получается тройник псевдосимметрии $(\bar{3}^{(3)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(3)}$ с осью $\bar{3}^{(3)}$, имеющей символ $[130]$ (рис. 7).

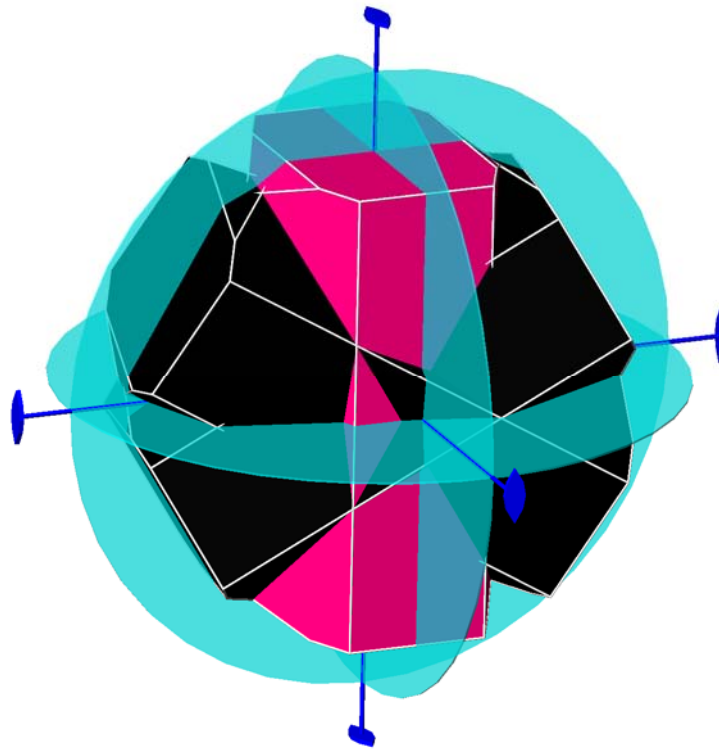


Рис. 7. Тройник псевдосимметрии $(\bar{3}^{(3)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(3)}$

Если же к первому индивиду прибавить два индивида, связанных с первым плоскостями $(\bar{2}31)$ и $(2\bar{2}1)$, то углы между осями с второго и третьего индивидов будут равны $59^{\circ} 26'$, углы между осями b этих же индивидов будут равны $59^{\circ} 16'$ и осями a , соответственно – $91^{\circ} 08'$, т.е. и в этом случае угловые соотношения между вторым и третьим индивидами близки к угловым соотношениям в двойниках по (231) , т.е. имеет место тройник псевдосимметрии $(\bar{3}^{(3)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(3)}$, но с осью $\bar{3}^{(3)}$, близкой к оси $[101]$. Запишем такой тройник символом $(\bar{3}^{(3)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(3)}$ по $[101]$ (рис.8).

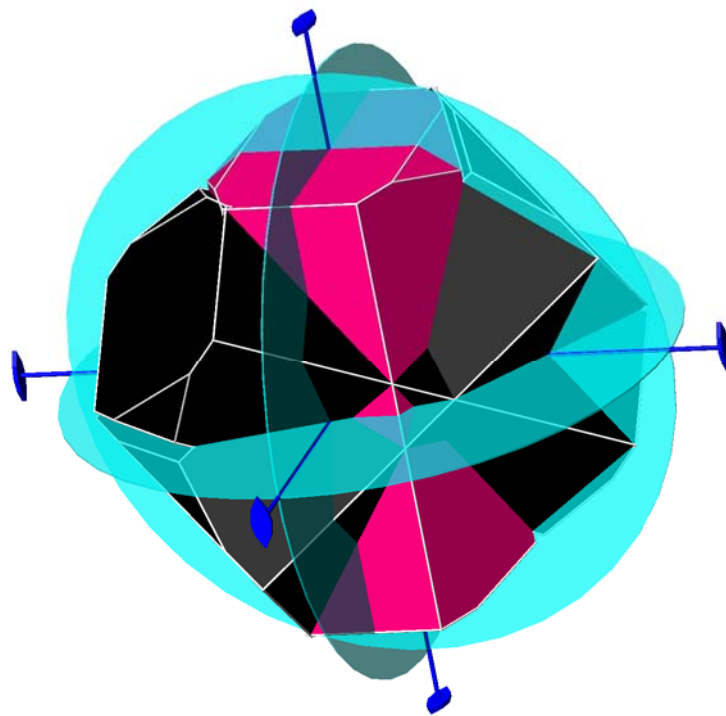


Рис. 8. Тройник $(\bar{3}^{(3)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(3)}$ по $[101]$

Ещё один вариант - первый индивид связан с двумя другими двойниковыми плоскостями $(2\bar{3}1)$ и $(\bar{2}31)$. Углы между осями с, b и a приложенных двойниковых индивидов будут равны $88^\circ 52'$, $91^\circ 08'$ и $0^\circ 58'$ соответственно. Такие угловые величины весьма близки к угловым величинам между соответствующими осями в двойниках по (031) . Таким образом, получаем сросток из трех индивидов, в котором первый со вторым и первый с третьим связаны законом $2'/m'$, по (231) , а второй индивид с третьим связан законом $4'/mmm'$ по $[100]$. Этот сросток относится к комплексным двойникам. Симметрия сростка $(2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(3)}$ (рис. 9).

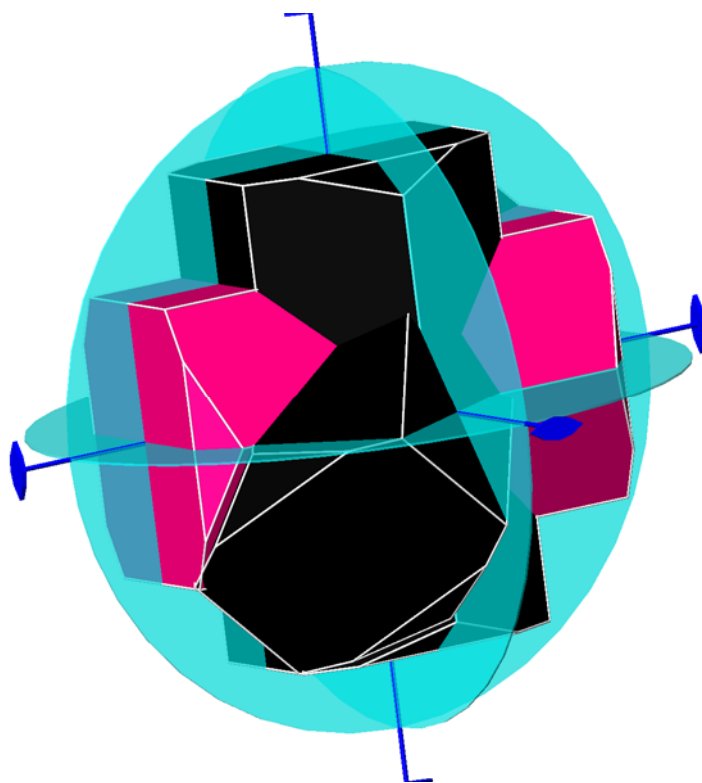


Рис. 9 Сросток из трех индивидов, относящийся к комплексным двойникам

Многие авторы не выделяют тройников по [101]. Но тройники по [101] и [130], несмотря на одинаковую группу симметрии и практически один и тот же двойниковый закон связи любых двух индивидов сростка, принципиально отличаются. В их ограничении участвуют разные гранные формы.

В огранке тройника по [101] участвуют: ромбоэдр {001}, призма дигексагональная {010}, ромбоэдр {201}, скаленоэдр гексагональный {110}. В тройнике по [130]: призма гексагональная {001}, скаленоэдр гексагональный {010}, {201} и {110}.

Рассмотрение всех остальных комбинаций трех индивидов с расположением индивидов относительно друг друга по двойниковым законам $2'/m'$ по (231) и $mm'm'$ по (031) показывает, что практически все они укладываются в выведенные типы сростков.

Для сростков четырех индивидов при тех же условиях связи возможны два типа. Первый тип — четверник симметрии $(\bar{4}^{(4)}/m^{(2)}2^{(2)}/m^{(2)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(4)}$. Псевдоось $\bar{4}^{(4)}$ должна иметь символ относительно первого индивида [031], поэтому можно записать закон четверникования как $(\bar{4}^{(4)}/m^{(2)}2^{(2)}/m^{(2)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(4)}$ по [031]. Второй сросток четырех индивидов должен быть комплексным двойником, в котором индивиды 1 и 2, 1 и 3, 1 и 4, 2 и 3, 2 и 4 связаны законом $2'/m'$ по (231), а 3 и 4 связаны

законом $4'/mmm'$ по [100]. Этот сросток можно определить как двойник двойников. В нем можно различить все разновидности тройников. Общая симметрия сростка $(2)^{(1,2)}/m^{(1,2)}(4)$.

Пять индивидов по тем же двойниковым законам связи между отдельными индивидами могут образовывать только один вид сростка — комплексный двойник, или тройник с двойником. Симметрия сростка $(2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(5)}$.

Наиболее полным будет сросток, состоящий из шести индивидов, который описывается группой псевдосимметрии кубической сингонии $(\bar{4}^{(2,4)}/m^{(1,2)}3^{(3)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(6)}$, называемый тройником двойников.

Возможно дальнейшее прибавление индивидов, но оно может идти только по другим законам.

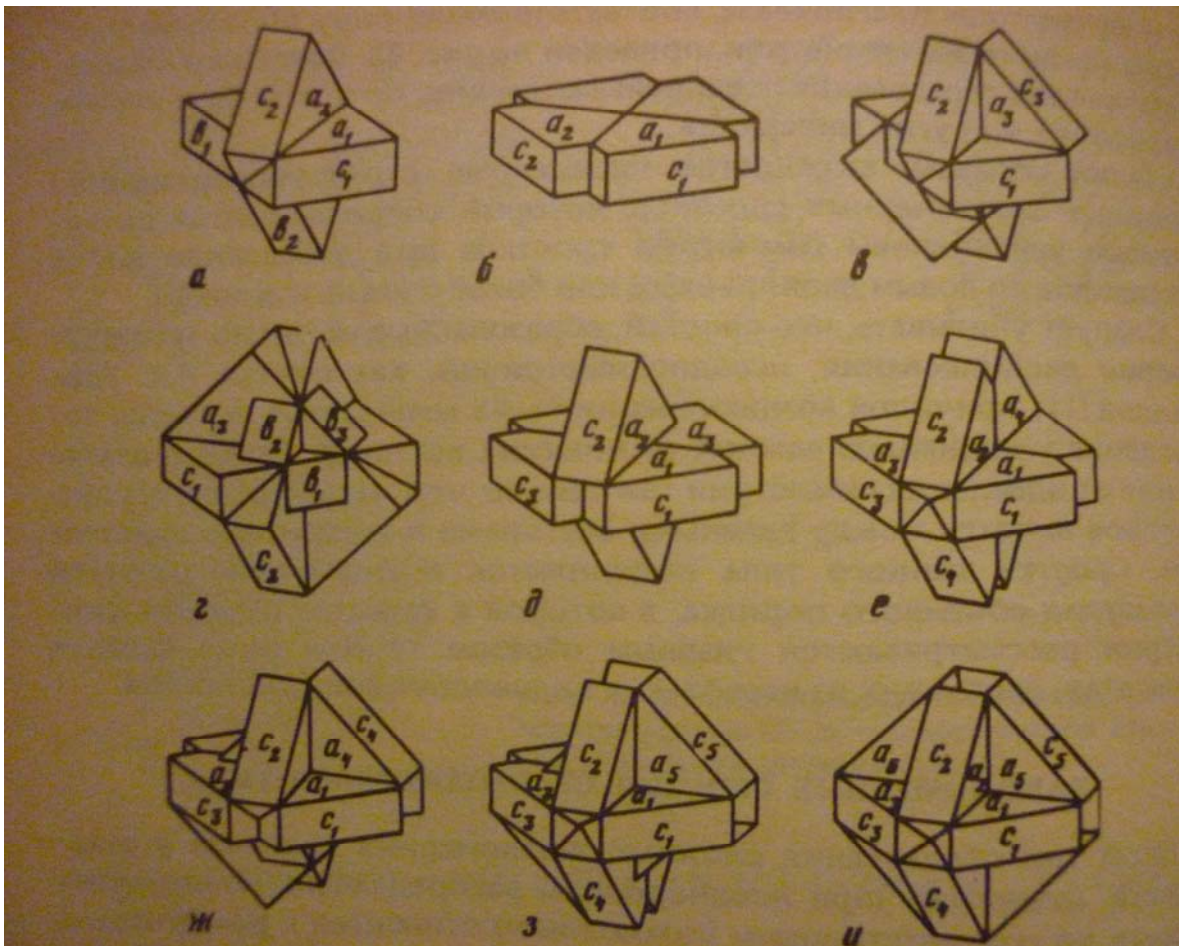


Рис.10 Ставролитовые сростки, выведенные Е.П. Макагоновым

В настоящее время найдена часть выведенных сростков. Среди них наиболее часто встречаются двойники, тройник по [130], комплексный двойник из трех индивидов и двойник двойников, называемый четверником.

В коллекции из месторождения Светлого на Южном Урале (сборы В.А. Попова, В.О.Полякова) Е.П. Макагоновым было исследовано 769 индивидов и сростков ставролита. Изученный материал распределился следующим образом: 34,1% составили одиночные индивиды; 53,3% - двойники; 11,7% - тройники; сростки четырех индивидов — 0,6%; сростки пяти индивидов — 0,3%.

Сростки двух индивидов представлены только распространенными двойниками по (231) и (031). Из них двойники $2'm'$ по (231) составляют 95,9%.

Из сростков трех индивидов преобладают тройники по [101] — 70%, примерно равное количество комплексных двойников (15,6%) и тройников по оси [130] (10%). В пробе также обнаружены три сростка, состоящих из двойника по (231) и индивида, находящегося по отношению к другим индивидам в незакономерной ориентировке.

Тройники $(\bar{3}^{(3)}2^{(1,2)}/m^{(1,2)})^{(3)}$ по [130] встречаются в основном в виде своеобразной вилки: к среднему индивиду примыкают два коротких индивида с положительного и отрицательного концов первой кристаллографической оси.

Среди сростков четырех индивидов обнаружено два двойника двойников и два сборных сростка, один из которых состоит из двойника по (231) и двух соприкасающихся с ним кристаллов в незакономерной ориентировке, второй представляет собой срастание двух двойников по (231).

В исследованной коллекции было обнаружено только два сростка пяти индивидов. Один из них представляет собой тройник по [130] с двумя кристаллами в незакономерной ориентировке, другой — комплексный двойник из трех индивидов с двумя кристаллами в незакономерной ориентировке.



Рис. 11 Природные сростки ставролита

Практически все кристаллы ставролита, выросшие на правильные сростки в неупорядоченной ориентировке, значительно уступают размерам индивидов в упорядоченных сростках и, как правило, имеют более совершенные грани. Возможно, эти кристаллы представляют собой вторую генерацию ставролита.

Исследование коллекции из месторождения Светлый показало, что на 98,6% сростки полностью соответствуют теоретически выведенным типам, а на 1,4% сростки состоят из тех же типов, но в комбинации с индивидами в неупорядоченной ориентировке.

Заключение

В ходе работы проведен обзор литературы, посвященной образованию двойников, законам двойникования. Более подробно рассмотрено двойникование кристаллов ставролита. Проведено описание кристаллов ставролита на макро и микроуровне. В работе показана зависимость морфологии двойников от структуры кристаллов. Рассмотрен вывод законов двойникования ставролита и сопоставление идеальных форм двойников с реальными. На основе рассмотренных законов построены модели некоторых сростков ставролита.

Список используемой литературы

1. А.Г. Бетехтин. « Курс минералогии», Москва 1961г.
2. М.Д. Дорфман. Ставролит// Минералы: Справочник. Москва 1972г.
3. Е.П. Макагонов. Симметрия сростков минеральных индивидов. Москва 1991г.
4. Н.И. Краснова, Т.Г. Петров. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Санкт-Петербург, 1995г.
5. В.А. Мокиевский. Морфология кристаллов. Ленинград 1983 г.