4. Формы кристаллов

4.1. Понятие простой формы

Как говорилось в разделе 1, одно из основных макроскопических свойств кристаллов – их способность самоограняться, т.е. расти в форме многогранников (полиэдров). Именно по внешней полиэдрической форме, по взаимному расположению равных элементов этой формы – граней, ребер, - мы определяли симметрию кристаллов. Однако видов симметрии 32, а разнообразие форм кристаллов чрезвычайно велико. К одному виду симметрии могут относиться совершенно различные по внешнему облику многогранники, отличающиеся друг от друга числом граней, их формой и относительными размерами. В качестве примера на рис. 4.1 показаны разные формы кристаллов кальцита $CaCO_3$ (инверсионно-планальный вид симметрии тригональной сингонии).

В основе описания и анализа морфологии кристаллов (греч. *морфе* – форма) лежит понятие простой формы. *Простая форма* – это совокупность граней, связанных друг с другом элементами симметрии кристалла. Собственно, мы уже имели дело с такими совокупностями граней, размножая их на проекции – при этом как раз и получался набор граней, составляющих простую форму. Очевидно, что грани, принадлежащие одной простой форме, должны иметь одинаковые очертания и размеры – раз их связывают элементы симметрии, значит, они равны друг другу. Заметим, что существуют также простые формы, состоящие из одной грани, см. раздел 4.2.

На кристалле обычно присутствуют грани нескольких простых форм – такой многогранник называется *комбинационным*. Число простых форм комбинационного многогранника равно числу граней разных сортов, т.е. различающихся по очертаниям и размерам (или, по крайней мере, не меньше этого числа, так как могут встречаться случаи, когда на кристалле присутствуют одинаковые грани, не связанные элементами симметрии, см. раздел 4.8). На рис. 4.2 показана одна из простых форм кристалла кварца (5) в составе комбинационного многогранника (а) и в чистом виде (б). По числу разных сортов граней на этом многограннике можно выделить пять простых форм.

Простые формы подразделяются на *закрытые (замкнутые) и открытые (незамкнутые).* Грани закрытых простых форм полностью замыкают заключенное между ними пространство (рис. 4.3а), грани открытой формы не замыкают пространство (рис. 4.3б). Если на кристалле присутствуют грани только одной простой формы, то эта форма закрытая. Наличие граней открытой простой формы требует обязательного присутствия на кристалле граней хотя бы еще одной простой формы (открытой или закрытой). Например, на рис. 4.2б простая форма 1 открытая, остальные – закрытые.

4.2. Описание простых форм

Хотя формы кристаллов – комбинационных многогранников бесконечно разнообразны, число простых форм ограничено и невелико, поскольку имеется всего 32 вида симметрии, и в каждом из них – небольшое число различных положений граней относительно элементов симметрии. Всего имеется 47 простых форм кристаллов. Все простые формы и их стереограммы изображены в табл. 4.1. Заметим, что в названия многих простых форм входят греческие числительные (раздел 2.5).

4.2.1. Простые формы низшей и средней категории

1. Моноэдр (одногранник) – грань, не размножаемая элементами симметрии либо в силу их отсутствия (примитивный вид симметрии триклинной сингонии), либо из-за особого положения перпендикулярно единственной полярной оси симметрии порядка n).
2. Диэдр (двугранник) – две грани, пересекающиеся в общем ребре и образующие «двускатную

крышу». Грани диэдра могут быть связаны осью симметрии L_2, перпендикулярной общему ребру (осевой диэдр), или плоскостью симметрии, проходящей через ребро (плоскостной диэдр).

3.Пинакоид (греч. пинакс – доска) - две равные и параллельные грани (частая ошибка – относить к пинакоиду два параллельных, но не равных, или даже равных, но не связанных элементами симметрии моноэдра).

Эти три простые формы, естественно, открытые, и могут встречаться лишь в комбинациях. Далее в горизонтальных строках таблицы помещены сходные простые формы разных сингоний – ромбической, тетрагональной, тригональной и гексагональной. В некоторых строках не все клетки заполнены, т.к. не все простые формы имеют аналогов в каждой из этих сингоний.

4 – 10. *Призмы* – сложены гранями, пересекающимися в параллельных ребрах, открыты с обоих концов и потому встречаются только в комбинациях.

4 – 7. *Ромбическая, тетрагональная, тригональная и гексагональная призмы*. Поперечные сечения - ромб, квадрат, правильный треугольник и правильный шестиугольник соответственно. В средних сингониях грани призмы параллельны главной оси симметрии, в ромбической сингонии – одной из осей второго порядка. Ромбические призмы возможны также в центральном виде симметрии моноклинной сингонии (раздел 4.4), но грани их наклонны к оси симметрии второго порядка.

8 – 10. Призмы с удвоенным числом граней – *дитетрагональная, дитригональная и дигексагональная призмы* . В ромбической сингонии такая форма невозможна. Удвоение граней можно создать, «разломив» каждую грань n-гональной призмы по средней линии, параллельной главной оси. Две «половинки» связаны плоскостью симметрии, проходящей через главную ось. Поперечные сечения этих призм – равносторонние многоугольники, углы в которых равны через один: дитетрагон, дитригон и дигексагон соответственно.

11 – 17. *Пирамиды* – сложены гранями, пересекающимися в одной точке (вершине), которая лежит на оси симметрии. Вершина может быть обращена либо вверх, либо вниз относительно плоскости проекции. Соответственно, проекции граней – либо только кружки, либо только крестики.

11 – 14. *Ромбическая, тетрагональная, тригональная и гексагональная пирамиды.* Форма поперечных сечений – как для соответствующих призм.

15 – 17. Пирамиды с удвоенным числом граней – дитетрагональная, дитригональная и дигексагональная пирамиды. Получаем «разламыванием» каждой грани соответствующей n-гональной пирамиды вдоль высоты грани. Две «половинки» связаны плоскостью симметрии, проходящей через главную ось. Формы поперечных сечений – как для соответствующих 2n-угольных призм.

Пирамиды – также открытые простые формы, возможные лишь в комбинациях. Все последующие простые формы – закрытые, и потому могут встречаться на кристаллах самостоятельно.

18 – 24. Дипирамиды. Эту форму можно рассматривать как две пирамиды, сложенные основаниями. Вершины двух пирамид лежат на одной оси симметрии. Нижние грани находятся точно под верхними и связаны с ними плоскостью симметрии, совпадающей с плоскостью общего основания, либо осями второго порядка, лежащими в этой плоскости. На стереограмме проекции верхних и нижних граней совпадают (крестики в кружках).

18 – 21. *Ромбическая, тетрагональная, тригональная и гексагональная дипирамиды.* Форма поперечных сечений – как для соответствующих призм и пирамид.

22 -24. Дипирамиды с удвоенным числом граней – *дитетрагональная, дитригональная и дигексагональная дипирамиды.* Смежные верхние или смежные нижние грани связаны плоскостями симметрии. Форма поперечных сечений – как для 2n-гональных призм и пирамид.

25 – 27. *Трапецоэдры* (греч. *трапеца* – неправильный четырехугольник) – *тетрагональный, тригональныц, гексагональный.* Трапецоэдр можно представить как дипирамиду, у которой верхняя и нижняя пирамиды развернуты вокруг общей оси симметрии L_3, L_4 или L_6 на произвольный угол (не

фиксируемый операциями симметрии). При таком развороте бывшие треугольные грани дипирамиды преобразуются в неправильные четырехугольники, откуда и название простой формы. Каждая нижняя грань расположена несимметрично между двумя верхними, каждая верхняя грань – несимметрично между двумя нижними. На стереограмме проекции верхних и нижних граней не совпадают (каждый крестик лежит несимметрично между двумя кружками, и наоборот). Смежная верхняя и нижняя грани связаны горизонтальной осью второго порядка, проходящей через середину общего ребра.

28 – 29. *Тетраэдры, ромбический и тетрагональный* - замкнутые четырехгранники, сложенные треугольными гранями так, что каждая нижняя грань лежит между двумя верхними, и наоборот, каждая верхняя грань – между двумя нижними (симметрично – в тетрагональном тетраэдре, несимметрично – в ромбическом). В *тетрагональном тетраэдре* грани – равносторонние треугольники, связанные инверсионной осью L_{i4}. Ось проходит через середины двух горизонтальных взаимно перпендикулярных ребер, в которых пересекаются две верхние и две нижние грани. В *ромбическом тетраэдре* эти горизонтальные ребра не перпендикулярны друг другу, через середины этих ребер проходит ось второго порядка. Грани ромбического тетраэдра – разносторонние треугольники, смежные верхняя и нижняя грани связаны горизонтальными осями второго порядка, проходящими через середины общих ребер. Ромбический тетраэдр можно представить как тетрагональный тетраэдр, «скрученный» вокруг оси L_{i4}, которая при этом превращается в L_2.

30. *Ромбоэдр* – замкнутый шестигранник, грани имеют форму ромбов, откуда и название. Точки пресечения трех верхних и трех нижних граней лежат на одной оси L_{i3}, связывающей все шесть граней. Каждая верхняя грань расположена симметрично между двумя нижними, каждая нижняя грань – симметрично между двумя верхними. Ромбоэдр можно представить как симметризованный тригональный трапецоэдр (и наоборот, тригональный трапецоэдр можно представить как «скрученный» вокруг оси L_3 ромбоэдр).

31-32. *Скаленоэдры* (греч. *скалена* – разносторонний, «косой» треугольник) – *тетрагональный и тригональный.* Формы, производные от тетрагонального тетраэдра и ромбоэдра соответственно, с удвоенным числом граней. Эти формы можно представить как результат «разламывания» граней исходных форм вдоль перпендикулярных этим граням плоскостей симметрии, проходящих через ось L_{i4} или L_{i3}. Эти плоскости симметрии и связывают «половинки» прежних граней. Каждая пара верхних граней лежит симметрично между двумя парами нижних граней, и наоборот.

Таким образом, мы получили для низшей и средней категорий 32 простые формы, показанные, вместе с их проекциями, в таблице 4.1.

4.2.2. Простые формы кубической сингонии

В кристаллах кубической сингонии появляется 15 новых простых форм. Все эти формы закрытые. Обращаем внимание, что ни одна из простых форм низших и средних сингоний не может встречаться в кубической сингонии! Грубой, но часто повторяющейся ошибкой является, например, определение формы №38 табл. 4.1 как тетрагональной дипирамиды, или формы №43 как трех пинакоидов.

Удобно рассматривать простые формы кубической сингонии как производные от трех основных простых форм – *тетраэдра, октаэдра и куба* (№№ 33, 38 и 43). Грани основных простых форм занимают строго фиксированное положение относительно элементов симметрии кубического кристалла: грани тетраэдра либо октаэдра перпендикулярны четырем осям L_3, грани куба перпендикулярны трем взаимно перпендикулярным осям симметрии L_2, L_{i4} или L_4. Образование производных форм происходит путем усложнения – удвоения, утроения, учетверения или даже ушестерения граней основных форм – подобно тому, как путем удвоения граней получали дигональные призмы, пирамиды и дипирамиды, а также скаленоэдры. Рассмотрим последовательно основные и производные простые формы кубической сингонии.

33. *Кубический тетраэдр* – единственный четырехгранник в кубической сингонии и единственная форма, название которой уже встречалось среди форм низшей и средней категорий. Помимо симметрии, отличается от рассмотренных выше ромбического и тетрагонального тетраэдров формой граней, которые представляют собой правильные (равносторонние) треугольники. На стереограмме проекции граней лежат на выходах осей L_3, причем в соседних квадрантах чередуются верхние и нижние грани (кружки и крестики).

34 – 36. *Тригонтритетраэдр, тетрагонтритетраэдр, пентагонтритетраэдр.* Первая часть названия каждой из этих форм отражает контур грани – треугольник, четырехугольник, пятиугольник. Вторая часть названия показывает, что каждая грань тетраэдра замещена тремя гранями (утроена), т.е. эти формы – двенадцатигранники. Ребра между замещающими гранями направлены из центра бывшей грани тетраэдра к ее вершинам (тригонтритетраэдр), серединам бывших ее ребер (тетрагонтритетраэдр) или косо к этим ребрам (пентагонтритетраэдр). Отсюда и разная форма замещающих граней. На стереограмме проекции граней тригонтритетраэдра и тетрагонтритетраэдра лежат на вспомогательных линиях, соединяющих выходы осей L_3 и L_2 (L_{i4})- см.рис.3.6,- и смещены от L_3 к L_2 (L_{i4}) для тригонтритетраэдра и в противоположную сторону для тетрагонтритетраэдра. Проекции граней пентагонтритетраэдра лежат внутри трех из шести сферических треугольников, образованных вспомогательными линиями, занимая их через один. Во всех случаях в соседних квадрантах чередуются верхние и нижние грани (тройки кружков и тройки крестиков).

37. *Гексатетраэдр.* Каждая грань тетраэдра замещена шестью гранями, т.е. это двадцатичетырехгранник. Замещающие грани треугольные, ребра между смежными гранями направлены из центра бывшей грани тетраэдра к ее вершинам и к серединам ее ребер. На стереограмме проекции граней лежат внутри всех сферических треугольников. В соседних квадрантах чередуются верхние и нижние грани (шестерки кружков и шестерки крестиков).

38. *Октаэдр* – восьмигранник, грани – правильные треугольники. На стереограмме проекции граней лежат на выходах осей L_3, под каждой верхней гранью находится нижняя грань (крестики в кружках).

39 – 41. *Тригонтриоктаэдр, тетрагонтриоктаэдр, пентагонтриоктаэдр.* Получаются утроением граней октаэдра, подобно соответствующим формам, производным тетраэдра. Таким образом, это двадцатичетырехгранники. Обращаем внимание, что в тригонтриоктаэдре и тригонтритетраэдре грани примыкают к бывшим ребрам исходных форм, а в тетрагонтриоктаэдре и тетрагонтритетраэдре – к бывшим вершинам. Однако в стандартной установке кристаллов три взаимно перпендикулярные оси симметрии ($3L_2$, $3L_{i4}$ или $3L_4$) выходят в вершины октаэдра, - но в середины ребер тетраэдра. Поэтому на стереограммах позициям граней тригонтриоктаэдра соответствуют позиции тетрагонтритетраэдра, и наоборот (сравни проекции №№ 34 и 39, 35 и 40).

При этом под каждой верхней гранью тригонтриоктаэдра и тетрагонтриоктаэдра находится нижняя грань (крестики в кружках). На стереограмме пентагонтриоктаэдра проекции верхних и нижних граней не совпадают, и шесть сферических треугольников в каждом квадранте заняты через один крестиками и кружками.

42. *Гексаоктаэдр* – сорокавосьмигранник, получается замещением каждой грани октаэдра шестью гранями по той же схеме, что и для гексатетраэдра. На стереограмме проекции верхних и нижних граней совпадают (крестики в кружках) и располагаются внутри всех сферических треугольников.

Таким образом, имеются две совершенно аналогичные серии простых форм - тетраэдрическая и октаэдрическая, по пять форм в каждой серии. Простые формы, производные от куба, образуются иными способами и имеют непохожие названия.

43. *Гексаэдр (куб)* – шестигранник, хорошо всем знакомая форма. Грани имеют квадратные контуры, попарно параллельны, двугранные углы прямые. На стереограмме проекции граней куба лежат на выходах трех взаимно перпендикулярных осей симметрии L_2, L_{i4} или L_4.

44. *Ромбододекаэдр* – двенадцатигранник, грани имеют форму ромбов, отсюда и название. Эту простую форму можно получить, симметрично притупляя ребра куба, т.е. проводя параллельно каждому ребру плоскость, равно наклоненную к соседним граням куба. На стереограмме проекции граней ромбододекаэдра занимают строго фиксированное положение (подобно проекциям граней трех основных форм) – на дугах больших кругов, проходящих через выходы взаимно перпендикулярных осей L_2, L_{i4} или L_4, на равных угловых расстояниях от этих выходов. В частности, четыре из двенадцати точек лежат на окружности круга проекций. Проекции нижних и верхних граней совпадают (крестики в кружках).

45. *Пентагондодекаэдр* - двенадцатигранник, грани имеют форму неправильных пятиугольников. Эту простую форму можно получить аналогично предыдущей, но притупляя ребра куба асимметрично. Еще проще вывести пентагондодекаэдр из куба, удваивая каждую грань куба («разламывая» ее на симметрично равные половинки). В результате на каждой грани куба как бы надстраивается двускатная крыша, причем «коньки» крыш на соседних гранях куба взаимно перпендикулярны. На стереограмме проекции граней пентагондодекаэдра лежат на тех же дугах больших кругов, что и проекции граней ромбододекаэдра (в частности, четыре точки – на окружности круга проекций), но расположены несимметрично относительно выходов взаимно перпендикулярных осей L_2, L_{i4} или L_4. Проекции верхних и нижних граней совпадают (крестики в кружках).

46. *Дидодекаэдр* – двадцатичетырехгранник, который можно получить из пентагондодекаэдра, удваивая его грани («разламывая» каждую грань на симметрично равные половинки, или надстраивая на каждой грани двускатную крышу). На стереограмме проекции граней дидодекаэдра лежат внутри сферических треугольников, занимая их через один. При этом, в отличие от пентагонтриоктаэдра, проекции верхних и нижних граней совпадают (крестики в кружках).

47. *Тетрагексаэдр* - двадцатичетырехгранник, который получается учетверением граней куба («разламыванием» их по диагоналям). В результате на каждой грани куба как бы надстраивается четырехскатная крыша. Можно также получить эту форму, «разламывая» грани ромбододекаэдра по коротким диагоналям. Отсюда следует и положение проекций граней тетрагексаэдра на стереограмме – они лежат на тех же дугах большого круга, что и проекции граней ромбододекаэдра, на равных угловых расстояниях от этих позиций. В частности, восемь из двадцати четырех точек лежат на окружности круга проекций. Проекции верхних и нижних граней совпадают (крестики в кружках).

15 простых форм кристаллов кубической сингонии плюс 32 простые формы кристаллов низшей и средней категорий и дают в сумме 47 возможных простых форм кристаллов.

4.3. Частные и общие простые формы

По положению граней относительно элементов симметрии кристалла различают частные и общие простые формы.

Простая форма называется *частной*, если ее грани занимают частные положения относительно элементов симметрии кристалла, а именно:

а - перпендикулярны каким-либо элементам симметрии;

б - параллельны каким-либо элементам симметрии;

в - лежат под равными углами к равным элементам симметрии.

Пункт *в* требует пояснения – что понимать под равными элементами симметрии. Одинаковые (одноименные) элементы симметрии являются *равными*, если они совмещаются друг с другом какими-либо из элементов симметрии данной фигуры. Например, в аксиальном или аксиально-центральном виде симметрии ромбической сингонии все три оси второго порядка не являются равными, так как не совмещаются имеющимися элементами симметрии. Аналогично, в планальном

виде симметрии тетрагональной сингонии из четырех плоскостей симметрии попарно равны плоскости, пересекающиеся под углами 90°, и не равны плоскости, пересекающиеся под углами 45°.

Простая форма называется *общей*, если ее грани занимают общее положение относительно элементов симметрии, т.е. не удовлетворяют условиям *а – в*.

Поскольку разные виды симметрии имеют разные наборы по-разному расположенных элементов симметрии, то простая форма, общая в каком-либо виде симметрии, может встречаться как частная в другом виде симметрии, и наоборот. При этом в каждом виде симметрии возможны общие простые формы только одного типа (одного наименования), т.е. каждый вид симметрии характеризуется определенной общей простой формой. Поэтому название простой формы, общей в данном виде симметрии, часто используется и для наименования самого вида симметрии (см. далее, табл. 4.2).

4.4. Простые формы, возможные в каждом виде симметрии

Показанные в таблице 4.1 простые формы легко узнаваемы по внешнему виду, и не составляет труда их запомнить. Однако на кристаллах простые формы встречаются, как правило, не индивидуально, а в комбинациях, и очертания их граней могут быть сильно искажены. Поэтому определить простую форму визуально даже на учебной модели, а тем более на реальном кристалле бывает очень не просто. Гораздо проще и надежнее сделать это на стереографической проекции (табл. 4.1). Как говорилось выше, в каждом виде симметрии имеется небольшое число различных положений граней относительно элементов симметрии. Соответственно, и на стереограмме этого вида симметрии проекции граней могут занимать небольшое число различающихся по симметрии позиций. Это число и соответствует числу возможных в данном виде симметрии простых форм *разного наименования* (табл. 4.2). Сразу обращаем внимание, что на кристалле могут присутствовать несколько простых форм *одного наименования* (см. например рис. 4.4а). Конечно, их гномостереографические проекции попадают в разные точки стереограммы, но положение этих точек относительно элементов симметрии (или симметрия этих позиций) одинаково (рис. 4.4б). Исключением являются виды симметрии L_2mC, $L_{i4}2L_22m$ и $L_{i3}3L_23m$. В этих видах симметрии возможны простые формы одного наименования, грани которых расположены по-разному относительно элементов симметрии (см. табл. 4.2, 4.3, 4.4, 4.5).

Используя стереографические проекции, для каждого вида симметрии легко вывести возможные в нем простые формы. Задав на стереограмме данного вида симметрии какую-либо точку (гномостереографическую проекцию возможной грани кристалла), размножим эту точку элементами симметрии, как это описано в разделе 3.5. Полученные таким образом точки принадлежат одной простой форме. По числу и взаимному расположению точек на проекции, а также путем сопоставления с проекциями простых форм табл. 4.1 можно сообразить, какую простую форму мы получили. Последовательно помещая точки в симметрично различные позиции на стереограмме и размножая их, получим все возможные в данном виде симметрии простые формы.

Для примера рассмотрим вывод простых форм планального вида симметрии ромбической сингонии. На стереограмме этого вида симметрии (рис. 4.5а) возможны следующие положения точек (проекций граней), различающиеся по симметрии:

1 – на выходе оси L_2 (грань, перпендикулярная оси второго порядка). Точка не размножается имеющимися элементами симметрии, т.е. *это моноэдр*. В частном случае такое положение могут занимать две параллельные грани – верхняя и нижняя, но это будут два моноэдра, а не пинакоид!

2 – на линиях, изображающих плоскости симметрии (грани, перпендикулярные плоскостям симметрии и наклонные к оси второго порядка). Каждая точка раздваивается второй плоскостью симметрии. Грани, соответствующие парам точек, пересекаются, т.е. это *плоскостные диэдры*. Диэдр может быть обращен ребром вверх (кружки 2) или вниз (крестики 2′).

3 – на пересечении линий, изображающих плоскости симметрии, с окружностью круга проекций (вертикальные грани, перпендикулярные плоскостям симметрии и параллельные оси второго порядка). Точки также удваиваются, но так как соответствующие им грани параллельны, то это *пинакоиды*.

4 – на окружности круга проекций, в произвольной ее точке (грани, параллельные оси L_2). Точка учетверяется плоскостями симметрии. Все четыре грани параллельны одному направлению – оси второго порядка. Следовательно, это *ромбическая призма*). В частном случае точка может лежать симметрично между двумя плоскостями *m* (точка 4′), т.е. угол между гранями призмы с точностью до минут или даже секунд равен 90°. Тем не менее, это ромбическая призма, а не тетрагональная , так как ось симметрии L_2 не связывает все четыре грани - они связаны этой осью только попарно.

Формы 1, 2, 3, 4 *частные*, так как их грани занимают частные положения относительно элементов симметрии.

5 – в круге проекций, в общем положении (т.е. это грани *общей* формы). Точки учетверяются элементами симметрии. Соответствующие грани пересекаются в одной точке, лежащей на оси симметрии. Это *ромбическая пирамида*. Пирамида может быть обращена вершиной вверх (кружки 5) или вершиной вниз (крестики 5′).

Этим исчерпывается число различающихся по симметрии позиций на стереограмме, а значит, и число простых форм, возможных в данном виде симметрии.

Заметим, что каждое из положений 2, 4, 5 может быть задано бесконечным числом способов, т.е. можно получить бесконечное число соответствующих простых форм одинакового наименования – диэдров, призм, пирамид, различающихся наклоном граней к элементам симметрии.

Разберем еще таким же образом инверсионно-планальный вид симметрии тетрагональной сингонии (рис. 4.5б). Здесь возможны следующие различающиеся позиции проекций граней:

1 – на выходе оси L_{i4}. Точка удваивается этой осью либо горизонтальными осями L_2. В отличие от похожего положения в предыдущем случае, это *пинакоид*.

2 – на линии, изображающей плоскость симметрии. Точка учетверяется осью L_{i4} либо осям L_2, причем точка, «верхняя» в данном квадранте (кружок), становится «нижней» в соседнем квадранте (крестик), и наоборот. Получили четырехгранник, каждая нижняя грань которого лежит симметрично между двумя верхними гранями. В соответствии с № 29 табл. 4.1 это *тетрагональный тетраэдр*.

3 – на линии, изображающей горизонтальную ось второго порядка. Отражение в плоскости симметрии учетверяет точку, оставляя ее «верхней», а повороты вокруг осей второго порядка переводят каждую «верхнюю» точку в совпадающую с ней «нижнюю» точку. Получили восьмигранник, у которого точки пересечения четырех верхних и четырех нижних граней лежат на одной оси, и нижние грани находятся точно под верхними. В соответствие с № 19 табл. 4.1 это *тетрагональная дипирамида*.

4 – на пересечении линии, изображающей плоскость симметрии, с окружностью круга проекций. Точка учетверяется осью L_{i4} или осями L_2. Поскольку все четыре полученные точки лежат на окружности круга проекций, соответствующие грани вертикальны и параллельны L_{i4}. Следовательно, это *тетрагональная призма*.

5 – на выходе горизонтальной оси L_2, а значит, и на окружности круга проекций. Точка учетверяется плоскостями симметрии или осью L_{i4}, все четыре грани параллельны этой оси. Это тоже *тетрагональная призма*. Обращаем внимание, что здесь мы имеем дело с одним из трех исключений, перечисленных выше и показанных в табл. 4.3, 4.4, 4.5 – грани простых форм одного наименования, тетрагональных призм 4 и 5, занимают разное положение относительно элементов симметрии. Грани призмы 4 перпендикулярны плоскостям симметрии, грани призмы 5 перпендикулярны осям симметрии второго порядка.

6 – на окружности круга проекций, в произвольном положении. Точка увосьмеряется плоскостями симметрии и осями второго порядка. Получаем восьмигранник, все грани которого параллельны L_{i4}. Это призма с удвоенным числом граней – *дитетрагональная призма.*

Все формы 1 – 6 частные.

7 – в общем положении, в круге проекций. Точка увосьмеряется плоскостями симметрии и осями L_2, четыре точки «верхние», четыре – «нижние». Проекции верхней и нижней соседних граней не совпадают, пара верхних граней расположена симметрично между двумя парами нижних граней (пара кружков лежит симметрично между двумя парами крестиков). Фигура получается как бы раздвоением граней тетраэдра. В соответствии с № 31 табл. 4.1 это *тетрагональный скаленоэдр* – общая форма в данном виде симметрии.

Как и в предыдущем случае, некоторые положения точек на стереограмме (граней относительно элементов симметрии) однозначны – точки 1, 4, 5. Другие положения – точки 2, 3, 6, 7 – могут быть заданы бесконечным числом способов. В этих случаях на кристалле возможно появление нескольких простых форм одного наименования - нескольких дипирамид, дитетрагональных призм, тетраэдров или скаленоэдров с разными наклонами граней относительно элементов симметрии.

Аналогично выводятся простые формы и для других видов симметрии. Результаты такого вывода представлены в таблице 4.2. Кроме триклинных видов симметрии, имеющих по одной простой форме, остальные виды симметрии имеют три, пять либо семь простых форм. Одна из этих форм общая, она и дает название виду симметрии (см. табл. 4.2).

Распределение простых форм по сингониям и видам симметрии показано в табл. 4.3 – 4.6. Видно, что одна и та же простая форма может встречаться в нескольких видах симметрии, и даже в разных сингониях. Так, ромбическая призма возможна не только в ромбической, но и в моноклинной сингонии (табл. 4.3). Гексагональная и дигексагональная призмы, гексагональные пирамида и дипирамида могут встречаться также и в тригональной сингонии. И наоборот, тригональные и дитригональные призмы и дипирамиды возможны в гексагональной сингонии (табл. 4.4). Но простые формы тетрагональной сингонии (кроме моноэдров и пинакоидов) в других сингониях невозможны. Мы обращаем на это внимание, так как иногда простые формы ромбической сингонии по углам между гранями и по положению их проекций на стереограммах очень близки к соответствующим тетрагональным формам. Различить эти случаи можно лишь по наличию дополнительных, часто мелких граней, выявляющих истинную симметрию кристалла (рис.4.6). 19 простых форм могут встречаться только в одном виде симметрии. В табл. 4.3 – 4.6 такие формы помечены звездочками.

4.5. Дополнительные замечания к определению простых форм

В комбинационном многограннике определить слагающие его простые формы «на глаз» бывает довольно сложно. Контуры граней данной простой формы зависят от того, какие другие формы принимают участие в огранке, и каково соотношение размеров граней разных простых форм. Диагностическим признаком контуры граней служить не могут. Какие же характеристики можно использовать для диагностики простой формы?

1 – сингония и вид симметрии кристалла. Это сразу резко ограничивает число возможных простых форм - от одной до максимально семи (табл. 4.2 – 4.6).

2 – число граней простой формы. Как уже говорилось, к одной простой форме принадлежат грани одного сорта, т.е. имеющие одинаковые очертания и размеры (конечно, имеются в виду идеальные учебные модели). Однако здесь надо быть осторожным. Возможны случаи, когда одинаковые грани принадлежат разным простым формам. Например, у кристалла, изображенного на рис. 4.7а, шесть вертикальных прямоугольных граней не составляют одной простой формы - гексагональной призмы, а принадлежат двум тригональным призмам. Действительно, смежные грани не связаны элементами

симметрии, что хорошо видно на стереограмме, рис. 4.7б. Таким образом, всегда необходимо проверять на модели или на проекции, существует ли симметрийная связь между одинаковыми гранями кристалла.

3 – положение граней простой формы относительно элементов симметрии. Мы использовали этот признак при выводе простых форм, возможных в каждом виде симметрии (табл. 4.2).

4 – взаимное расположение граней простой формы. Этот признак использовался при описании простых форм (табл. 4.1 и относящийся к ней текст).

Для облегчения диагностики простых форм, слагающих огранку комбинационных многогранников, перечисленные характеристики сведены в таблицы 4.7 – 4.9.

4.6. Разновидности простых форм

4.6.1. Разновидности простых форм по симметрии

Как уже говорилось, и как показывают таблицы 4.2 – 4.6, одна и та же простая форма может встречаться в разных видах симметрии и даже в разных сингониях. Понятно, что грани данной простой формы в разных видах симметрии имеют (но не всегда!) и разную собственную симметрию, т.е. разный набор элементов симметрии, нормальных данной грани. Это и есть *симметрийные разновидности простых форм*. Так, например, моноэдр в планальном виде симметрии гексагональной сингонии имеет симметрию $L_6 6m$, в примитивном виде симметрии той же сингонии – L_6, в планальном виде симметрии тетрагональной сингонии – $L_4 4m$, в инверсионно-примитивном виде моноклинной сингонии – m, и т.п. – всего 10 разновидностей моноэдров разной симметрии. В случаях одинаковой собственной симметрии граней простой формы в разных видах симметрии различной будет симметрия всего комплекса граней, составляющих простую форму. Например, собственная симметрия граней диэдра – L_1, но диэдр в целом (двугранник) может иметь симметрию L_2 (осевой) или *m* (плоскостной). Больше всего разновидностей имеет пинакоид – 21, у гексагональной призмы 11 разновидностей, у куба – 5, и т.д. Всего разновидностей простых форм, различающихся по симметрии, насчитывается 146.

4.6.2. Энантиоморфные простые формы

Простые формы данного наименования, одинаковые по симметрии (и значит, принадлежащие одному виду симметрии), могут различаться по хиральности, т.е. правизне-левизне. Такие формы относятся друг к другу как предмет и его зеркальное отражение, и называются *энантиоморфными*. Энантиоморфные формы могут встречаться только в видах симметрии, в которых отсутствуют инверсионные оси симметрии (в том числе плоскости симметрии и центр инверсии). Следовательно, это примитивные и аксиальные виды симметрии. Так, правыми и левыми могут быть такие формы, как ромбические тетраэдры, трапецоэдры, пентагонтритетраэдры, пентагонтриоктаэдры. Знаки хиральности, конечно, условные. Принято, что в правых формах верхняя часть (в стандартной установке) повернута относительно нижней части по часовой стрелке, в левых формах – против часовой стрелки (рис. 4.8). В примитивных видах симметрии (кроме кубической сингонии) правизной-левизной обладают не отдельные простые формы, а их комбинации – см. например рис. 4.9. В аксиальных видах симметрии комбинационные многогранники могут быть правыми и левыми и при отсутствии на них энантиоморфных форм, различаясь по взаимному положению граней нейтральных форм. Так, изображенные на рис. 4.10 правый и левый кристаллы кварца различаются по положению граней тригональной дипирамиды относительно граней большого ромбоэдра и гексагональной призмы.

С учетом энантиоморфных форм количество разновидностей простых форм повышается до 193.

4.7. Ложная морфологическая симметрия и ложные простые формы

У реальных кристаллов морфологическая симметрия может быть как выше, так и ниже истинной (структурной) симметрии. Первый случай именуется гиперморфией, второй – гипоморфией.

Гиперморфия - завышенная морфологическая симметрия кристалла – связана, как правило, с законом Браве. Этот закон гласит, что морфологическая значимость грани, т.е. ее относительное развитие на кристалле, пропорциональна ее ретикулярной плотности (греч. *ретикула* – сетка), или двумерной плотности частиц в плоских сетках, параллельных данной грани. Иными словами, кристалл при росте покрывается гранями с наибольшей ретикулярной плотностью. Это обычно грани частных простых форм. Однако истинную морфологическую симметрию, как правило, определяют грани общих простых форм или подчиненных частных форм с малой ретикулярной плотностью. В соответствии с законом Браве вероятность появления таких граней на кристалле невелика. Отсюда и возникает гиперморфия.

Классический пример – кристаллы кварца. Истинная симметрия этих кристаллов выявляется по наличию граней тригонального трапецоэдра (общая форма) либо тригональной дипирамиды (частная форма, но с низкой ретикулярной плотностью). Эти грани на природных кристаллах кварца появляются исключительно редко. В огранке остаются гексагональная призма, большой и малый ромбоэдры, и морфологическая симметрия повышается с $L_3 3L_2$ до $L_3 3L_2 3mC$ (рис. 4.11а). Более того, часто грани двух ромбоэдров имеют одинаковые размеры, и тогда внешняя симметрия кварца повышается до $L_6 6L_2 7mC$ (рис. 4.11.б).

Другой пример – кристаллы $NaClO_3$, вид симметрии $3L_2 4L_3$. Кристаллы ограняются исключительно гранями куба, т.е. морфологическая симметрия $3L_4 4L_3 6L_2 9mC$. Изредка появляются резко подчиненные грани тетраэдра, но и тогда внешняя симметрия не ниже $3L_{i4} 4L_3 6m$.

Гипоморфия – занижение морфологической симметрии кристалла, связанное с неравномерным развитием (разной величиной и очертаниями) симметрично равных граней. Иногда некоторые из граней простой формы могут вообще отсутствовать вследствие их зарастания. Причиной этого является, как правило, неравномерный подвод вещества к растущему кристаллу или неравномерный отвод теплоты кристаллизации. Как было показано в разделе 2.7, распределение потоков вещества в среде кристаллизации можно описать предельными группами симметрии. Тогда снижение внешней симметрии кристалла можно рассматривать как результат взаимодействия истинной симметрии кристалла и симметрии среды кристаллизации. Это взаимодействие описывается знаменитым *принципом Кюри* , который в приложении к росту кристаллов формулируется так: *кристалл сохраняет в своей внешней форме лишь те элементы симметрии, которые являются общими как для кристалла, так и для среды, в которой он растет.*

Из принципа Кюри следует, что морфологическая симметрия кристалла сохраняется, если симметрия среды отвечает симметрии шара $\infty L_\infty \infty mC$. Тогда каждому элементу симметрии кристалла найдется соответствующий элемент симметрии среды (учтем, что L_∞ содержит в себе оси симметрии любого порядка). При иной симметрии среды внешняя симметрия кристалла в общем случае понижается. Сохраниться она может лишь в очень частных случаях (например, кристалл планального вида симметрии растет в среде с симметрией конуса, причем ось симметрии кристалла параллельна оси L_∞ конуса).

Чтобы определить, до какого вида симметрии понизилась внешняя симметрия кристалла, надо знать не только его истинную симметрию и симметрию среды, но и взаимную ориентировку элементов симметрии кристалла и среды. Так, кристалл кубической сингонии аксиально-центрального вида симметрии $3L_4 4L_3 6L_2 9mC$, растущий в среде с симметрией конуса, в разных вариантах ориентировки

относительно конуса приобретет следующую внешнюю симметрию: $L_4 4m$ при $L_4 \| L_\infty$; $L_3 3m$ при $L_3 \| L_\infty$; $L_2 2m$ при $L_2 \| L_\infty$; m при $m \| L_\infty$ (и при этом ни одна из осей симметрии не совпадает с L_∞); 1, если ни один элемент симметрии кристалла не параллелен оси бесконечного порядка конуса. В последнем случае сингония внешней формы кристалла понижается до триклинной.

Неодинаковое развитие разных граней одной простой формы приводит к появлению на кристалле так называемых *ложных форм.* Действительно, в вырожденном виде симметрии, как правило, невозможны простые формы, характерные для исходного вида симметрии кристалла. В результате присутствовавшие на кристалле простые формы «распадаются» на менее симметричные формы. Так, если кристалл, растущий в среде с симметрией конуса, исходно имеет форму куба, то при $L_4 \| L_\infty$ куб распадается на тетрагональную призму (с гранями, параллельными L_∞) и два моноэдра (с гранями, перпендикулярными L_∞) – рис. 4.12а. Октаэдр при $L_2 \| L_\infty$ распадается на два диэдра (грани, наклонные к L_∞) и ромбическую призму (грани, параллельные L_∞) – рис. 4.12б. В предельном случае отсутствия совпадений между элементами симметрии кристалла и среды любая простая форма распадается на моноэдры.

4.9. Двойники

До сих пор мы рассматривали симметрию и формы *монокристаллов* или кристаллических *индивидов*. Совокупность кристаллических индивидов, незакономерно разориентированных друг относительно друга, представляет собой *поликристаллический агрегат*. Промежуточное положение занимают кристаллические образования, состоящие из двух или большего числа частей (*субиндивидов)*, разориентированных друг относительно друга строго закономерно и связанных симметрическими преобразованиями. Такие объекты традиционно называют *двойниками*, хотя субиндивидов в них может быть и гораздо больше двух (см. далее).

4.9.1. Симметрия двойников

Симметрические преобразования, связывающие субиндивиды двойника, именуются *двойникующими преобразованиями*, а соответствующие им элементы симметрии – *двойниковыми элементами симметрии.* В качестве таковых могут выступать плоскость симметрии (*двойниковая плоскость*) – рис. 4.13а, поворотная ось симметрии второго порядка (*двойниковая ось*) – рис.4.13б, и изредка – центр инверсии. Возможно одновременное присутствие двойниковой плоскости и двойниковой оси – рис. 4.13в. Для двойниковых элементов симметрии будем использовать обычные обозначения с индексом tw (англ. twin – *двойник)* - L_{tw} , m_{tw} , C_{tw} . Важно четко понимать, что двойниковые элементы симметрии не могут входить в набор элементов симметрии исходного монокристалла – иначе они переводили бы монокристалл самого в себя, а не в другой субиндивид двойникового комплекса. К сожалению, ошибки, связанные с недопониманием этого положения, встречаются даже в серьезных учебниках.

Тип двойникового элемента симметрии и его ориентировка относительно исходного монокристалла определяют *закон двойникования*, а значит, и способ взаимной разориентировки субиндивидов двойника. Распространенные законы двойникования часто имеют собственные имена. Так, двойник кварца на рис. 4.13а образован по японскому закону, двойник полевого шпата на рис. 4.13б - по *карлсбадскому закону*, двойник алмаза на рис. 4.13в – по *шпинелевому закону.* Кристаллы одного и того же вещества (минерала) могут двойниковаться по разным законам. Например, в двойниках кварца по дофинейскому *закону* двойниковая ось совпадает с осью симметрии третьего порядка, т.е. $L_{tw} \| L_3$ – рис. 4.14а. Двойниковые субиндивиды либо оба правые, либо оба левые, так как поворот вокруг двойниковой (простой) оси симметрии не меняет хиральности. В двойниках кварца по *бразильскому закону* (рис. 4.14б) двойниковая плоскость перпендикулярна одной из осей второго

порядка, $m_{tw} \perp L_2$. При отражении в плоскости хиральность меняется, поэтому в бразильском двойнике один субиндивид правый, другой левый. В двойниках кварца по японскому закону (рис. 4.13а) двойниковая плоскость параллельна грани тригональной дипирамиды и также связывает субиндивиды разной хиральности. Большое количество двойниковых законов характерно для низкосимметричных минералов, например, для плагиоклазов.

При одинаковом развитии субиндивидов двойник представляет собой симметричный комплекс, который удобно описывать в рамках *черно-белой симметрии* или *антисимметрии*. Представим себе один из субиндивидов двойника окрашенным в черный цвет, а второй – в белый («антиравные» фигуры). Полный набор элементов симметрии такого черно-белого комплекса будет включать как обычные элементы симметрии, так и элементы двуцветной симметрии, или антисимметрии. Эти элементы, переводя один субиндивид в другой, одновременно «перекрашивают» его. Для элементов антисимметрии будем использовать обычные обозначения, но со штрихом. Двойниковые элементы симметрии в черно-белом комплексе становятся элементами антисимметрии и, взаимодействуя с обычными элементами симметрии исходного кристалла, порождают по теоремам сложения дополнительные элементы антисимметрии. Так, для дофинейского двойника кварца (рис. 4.14а) двойниковая ось при взаимодействии с параллельной ей простой осью третьего порядка даст черно-белую ось шестого порядка L_6', которая переведет $3L_2$ в $3L_2'$. В итоге вид черно-белой симметрии будет $L_6'3L_23L_2'$. В бразильском двойнике кварца (рис. 4.14б) двойниковая плоскость, перпендикулярная L_2, даст черно-белый центр инверсии C', порождая в сумме с L_3 черно-белую ось L_{i3}' и размножаясь этой осью в $3m'$. Черно-белый вид симметрии будет $L_{i3}'3L_23m'$.

В двойниковый вид симметрии переходят не все элементы симметрии монокристалла, а только те, которые вместе с элементами антисимметрии образуют один из 32 видов кристаллографической симметрии. При этом максимальное количество элементов симметрии монокристалла сохраняется в двойниковом комплексе в том случае, когда двойниковые элементы симметрии проходят через центр кристалла – как в рассмотренных двойниках кварца. Если же двойниковые элементы не проходят через центр кристалла, то в двойниковом комплексе остается меньше элементов симметрии. Так, на рис. 4.15 изображены двойники гипса по галльскому закону, в которых двойниковая плоскость проходит (а) и не проходит (б) через центр исходного монокристалла. В первом случае все элементы симметрии монокристалла – L_2, m,C –переходят в двойниковый комплекс, и его черно-белая симметрия – $L_22L_2'm2m'C$. Во втором случае (т.н. двойник «ласточкин хвост») в двойниковый комплекс переходит только плоскость симметрии m, и симметрия двойника ниже – $L_2'mm'$.

4.9.2. Морфология двойников

Формы двойниковых образований чрезвычайно разнообразны.

Прежде всего, различаются 2 типа двойниковых комплексов по способу соединения субиндивидов - двойники срастания и двойники прорастания (обращаем внимание, что эти названия определяют только морфологию двойников, а не механизм их образования!).

Двойники срастания (или *контактные двойники*) имеют четкие плоские границы соприкосновения субиндивидов. Эти плоскости, как правило (но не всегда), отвечают реальным или возможным граням кристалла. Плоскость «срастания» может совпадать с двойниковой плоскостью, а может и не совпадать. Центры субиндивидов не совпадают и лежат по разные стороны плоскости «срастания». Двойники, как правило, имеют входящие углы между гранями, примыкающими к плоскости соприкосновения субиндивидов, и часто уплощены по нормали к этой плоскости или вытянуты вдоль нее. На рис. 4.13а показан двойник срастания кварца по плоскости дипирамиды, на рис. 4.13в – двойник срастания алмаза по плоскости октаэдра. Двойник гипса «ласточкин хвост» (рис.4.15б) также относится к двойникам срастания.

В *двойниках прорастания* субиндивиды взаимно проникают друг в друга. На рис. 4.16 изображен двойник прорастания алмаза кубического габитуса по шпинелевому закону (ср. с рис. 4.13в). К двойникам прорастания относятся также карлсбадский двойник полевого шпата (рис.4.13б), дофинейский и бразильский двойники кварца (рис. 4.14а,б), галльский двойник гипса (рис. 4.15а). Граница соприкосновения субиндивидов в таких двойниках имеет чрезвычайно неправильную конфигурацию, не отвечающую каким-либо структурным плоскостям (рис. 4.17). В полностью развитом двойнике прорастания центры субиндивидов совпадают. Иногда двойники прорастания не имеют входящих углов, и в этом случае они имитируют монокристаллы – например, двойники кварца (рис. 14), арагонита.

Двойниковые комплексы различаются также по частоте актов двойникования, подразделяясь на простые (однократные) и повторные (многократные) двойники.

Простые двойники состоят только из двух субиндивидов, т.е. двойникование произошло однократно. Все двойники, изображенные на рис. 13 – 16, являются простыми.

Многократные двойники состоят более чем из двух субиндивидов – от трех до очень большого числа. Эти двойниковые комплексы достаточно разнообразны и, в свою очередь, подразделяются на несколько типов.

Полисинтетические двойники – плоскости «срастания» параллельны. Чаще всего двойникование происходит по одному закону, и элементы двойникования также параллельны. Многократно чередуются субиндивиды в двух ориентировках, так что субиндивиды, расположенные через один, находятся в параллельной ориентировке. На рис. 4.18а показан полисинтетический двойник плагиоклаза по альбитовому закону. Так же двойникуются кальцит, пироксены. Возможно полисинтетическое двойникование по двум законам. В тех же плагиоклазах соседние субиндивиды могут быть сдвойникованы по альбитовому и по карлсбадскому законам, тогда субиндивиды, расположенные через один, оказываются сдвойникованными по сложному альбит-карлсбадскому закону.

Круговые двойники – плоскости «срастания» не параллельны, но принадлежат одной зоне. Двойникование может быть по одному или по двум законам. На рис. 4.18б изображен тройник арагонита, в котором субиндивиды сдвойникованы по плоскостям ромбической призмы. Могут возникать и более сложные комплексы - четверники, шестерники, восьмерники. Дальнейшее усложнение этого типа двойников – двойникование по кристаллографически эквивалентным плоскостям, не лежащим в одной зоне – например, по нескольким плоскостям октаэдра кубического кристалла (алмаз, германий).

Комплексные двойники – двойникование по нескольким двойниковым законам, двойниковые элементы не параллельны, равно как и плоскости «срастания». При этом образуются наиболее сложно построенные двойниковые комплексы. На рис. 4.18в показан комплексный двойник минерала филлипсита (алюмосиликат калия и кальция), в котором субиндивиды связаны четырьмя законами двойникования. Комплексные двойники характерны для плагиоклазов в связи с большим разнообразием их двойниковых законов.

Подписи к рисункам к разделу 4

Рис. 4.1. Формы кристаллов кальцита.

Рис. 4.2. Комбинационный многогранник – кристалл кварца – а, и одна из простых форм (5) в чистом виде – б.

Рис. 4.3. Закрытая (а) и открытая (б) простые формы.

Рис.4.4. Комбинация трех тетрагональных дипирамид, а – кристалл, б – проекция.

Рис. 4.5. К выводу возможных простых форм в планальном виде симметрии ромбической сингонии (а) и в инверсионно-планальном виде симметрии тетрагональной сингонии (б).

Рис. 4.6. Тетрагональный (а) и псевдотетрагональный ромбический (б) тетраэдры. Истинную ромбическую симметрию кристалла (б) выявляют грани подчиненного развития.

Рис. 4.7. Пример принадлежности одинаковых граней разным простым формам. Грани 1-3-5 и 2-4-6 – две тригональные призмы. А – кристалл, б – проекция.

Рис. 4.8. Левые (а) и правые (б) простые формы; 1 – трапецоэдры, 2 – ромбические тетраэдры, 3 – пентагонтритетраэдры, 4 – пентагонтриоктаэдры.

Рис. 4.9.Энантиоморфные комбинационные многогранники: левый (а) и правый (б) кристаллы винной кислоты.

Рис. 4.10. Левый (а) и правый (б) кристаллы кварца, различающиеся по положению граней тригональной дипирамиды s.

Рис. 4.11. Кристаллы кварца с завышенной морфологической симметрией.

Рис. 4.12. Ложные простые формы кристаллов кубического (а) и октаэдрического (б) габитуса, растущих в среде с симметрией конуса.

Рис. 4.13. Двойниковые элементы симметрии: а – двойниковая плоскость (японский двойник кварца); б – двойниковая ось (карлсбадский двойник полевого шпата); в – двойниковые ось и плоскость (шпинелевый двойник алмаза).

Рис. 4.14. Двойники кварца: а –дофинейский, б – бразильский.

Рис. 4.15. Галльские двойники гипса: а – центры индивидов совпадают, б – центры индивидов не совпадают.

Рис. 4.16. Двойник прорастания алмаза кубического габитуса по шпинелевому закону.

Рис. 4.17. Поперечный разрез дофинейского двойника кварца.

Рис. 4.18. Многократные (повторные) двойники: а – полисинтетический двойник плагиоклаза; б – круговой двойник арагонита; в – комплексный двойник филлипсита.

Подписи к таблицам

Табл. 4.1. Простые формы и их проекции.

Табл. 4.2. Простые формы, возможные в каждом виде симметрии.

Табл. 4.3. Простые формы низшей категории – распределение по видам симметрии.

Табл. 4.4. Простые формы тетрагональной сингонии – распределение по видам симметрии.

Табл. 4.5. Простые формы тригональной и гексагональной сингонии – распределение по видам симметрии.

Табл. 4.6. Простые формы кубической сингонии – распределение по видам симметрии.

Табл. 4.7. К определению простых форм низшей категории.

Табл. 4.8. К определению простых форм средней категории.

Табл. 4.9. К определению простых форм кубической сингонии.