

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

К.Л. Новоселов

ОСНОВЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИИ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2015

УДК 548.1(075.8)

ББК 22.37я73

Н76

Новоселов К.Л.

Н76 Основы геометрической кристаллографии : учебное пособие / К.Л. Новоселов ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 73 с.

В пособии рассматриваются основные вопросы геометрической кристаллографии – внутреннее строение кристаллических тел и взаимосвязь его с внешней формой кристаллов, законы симметрии кристаллов, практические приёмы определения элементов симметрии. Теоретические разделы сопровождаются наглядными иллюстрациями и примерами реальных кристаллов минералов. Зарисовки простых форм сгруппированы по классам симметрии и сингониям. Приводятся примеры определения простых форм в комбинациях. Основные вопросы физико-химической кристаллографии включают возникновение и рост кристаллов в лабораторных и природных условиях, факторы, влияющие на форму кристаллов, и рассматриваются в контексте их связи с минералогией.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 21.05.02 «Прикладная геология», и для студентов других геологических специальностей.

УДК 548.1(075.8)

ББК 22.37я73

Рецензенты

Кандидат геолого-минералогических наук
заведующий сектором литологии
лаборатории седиментологии ОАО «ТомскНИПИнефть»

М.В. Шалдыбин

Кандидат геолого-минералогических наук
геолог 1 категории ОАО «Кузбассгипрошахт»

А.В. Наставко

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

© Новоселов К.Л., 2015

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА	6
1.1. Аморфные тела	6
1.2. Кристаллические тела и кристаллы	6
1.2.1. Пространственная решетка	6
1.2.2. Определение кристалла. Связь внешней формы кристалла с его внутренним строением	9
1.2.3. Основные свойства кристаллов	10
2. СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ	11
2.1. Элементы симметрии кристаллов	11
2.1.1. Ось симметрии	11
2.1.2. Плоскость симметрии	12
2.1.3. Центр симметрии	13
3. КЛАССИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ	15
4. ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ	16
4.1. Номенклатура простых форм	19
5. СИСТЕМЫ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОСЕЙ	20
5.1. Закон целых чисел	22
5.2. Символы граней	24
6. СИСТЕМАТИКА КРИСТАЛЛОВ	25
6.1. Кубическая сингония ($4L_3$)	25
6.2. Тетрагональная сингония (L_4)	30
6.3. Гексагональная сингония (L_6)	32
6.4. Тригональная сингония (L_3)	34
6.5. Ромбическая сингония	36
6.6. Моноклинная сингония	37
6.7. Триклинная сингония	38
6.8. Порядок работы с моделями кристаллов	38

7. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РОСТ КРИСТАЛЛОВ	48
7.1. Возникновение кристаллов	49
7.2. Рост кристаллов	49
7.3. Факторы, влияющие на форму кристаллов	52
7.3.1. Концентрационные потоки	52
7.3.2. Концентрация и температура раствора	53
7.3.3. Примеси в растворе	54
8. ЗАКОН ПОСТОЯНСТВА ГРАННЫХ УГЛОВ	55
9. ФОРМЫ РЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ	57
9.1. Сростки кристаллов	59
9.2. Двойники	59
9.3. Усложненные формы кристаллов	62
9.4. Внутреннее строение кристаллов	65
9.5. Включения в кристаллах	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	72

ВВЕДЕНИЕ

Цель предлагаемых методических материалов – помочь студенту в изучении основ кристаллографии, на знаниях которых базируются такие геологические дисциплины, как минералогия, петрография и геохимия. Отсутствие учебников по кристаллографии для бакалавров создает определенные трудности обучающимся при самостоятельном изучении отдельных разделов кристаллографии. В основу данного руководства положен многолетний опыт преподавания дисциплины на кафедре минералогии и петрографии ТПУ, методика которого была заложена профессором кафедры А.М. Кузьминым (1891–1980), внесшим большой вклад в развитие кристаллографии как науки.

Кристаллография – наука о кристаллах. *Кристаллом* называется твердое тело, имеющее форму геометрически правильного многогранника. Элементы поверхности кристалла: грани (плоскости, ограничивающие кристалл), ребра (линии пересечения граней), вершины (точка пересечения ребер).

Содержание кристаллографии определяется ее тесной связью с такими естественными науками, как химия, физика, математика, и включает следующие разделы:

1. Геометрическая кристаллография – изучает внешнюю форму кристаллов и закономерности их внутреннего строения.
2. Кристаллохимия – изучает связь между внутренним строением кристаллов и их химическим составом.
3. Физико-химическая кристаллография – исследует закономерности образования и роста кристаллов.
4. Физическая кристаллография (кристаллофизика) – занимается исследованием физических свойств кристаллов (механические, тепловые, электрические, магнитные, оптические). Оптические свойства кристаллов выделены в специальный раздел кристаллофизики, называемый *кристаллооптикой*.

Наряду с указанными разделами, немаловажное значение имеет кристаллография как неразрывная часть минералогии – большинство минералов образуются в форме кристаллов, а для некоторых минералов облик кристаллов служит основным диагностическим признаком при микроскопическом определении.

В данном руководстве рассматриваются вопросы, главным образом геометрической кристаллографии, знание которых составляет основу успешного изучения минералогии и петрографии. Кратко излагается теория возникновения и роста кристаллов, поскольку внешняя форма кристаллов несет большую информацию о физико-химических условиях среды кристаллизации.

1. АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

В природе вещество находится в жидком, газообразном и твердом состояниях. Кристаллография изучает твердые тела. Среди твердых тел различают аморфные, кристаллические тела и кристаллы.

1.1. Аморфные тела

Аморфными называются твердые тела, в которых материальные частицы (атомы, ионы или молекулы) расположены беспорядочно. Примерами аморфных образований служат стекла, смолы, пластмассы, клей и др. Среди природных образований в земной коре в аморфном состоянии известны такие минералы, как опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, хризокolla $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и некоторые другие. Отличительное свойство аморфного тела – изотропность. Под изотропностью понимаются одинаковые свойства вещества (например, твердость, электро- и теплопроводность) в различных направлениях. Аморфное состояние неустойчиво, и со временем происходит раскристаллизация – переход вещества из аморфного состояния в кристаллическое.

1.2. Кристаллические тела и кристаллы

Принципиальное отличие кристаллических тел от аморфных заключается в упорядоченности расположения материальных частиц. Современная теория внутреннего строения кристаллов получила развитие еще в начале XIX века, когда Волластоном была предложена идея о строении кристаллов по закону пространственной решетки. В начале XX века работами немецкого физика М. Лауэ удалось экспериментально подтвердить закономерное расположение частиц в структуре кристаллов, а в 1947 году были получены фотографии, непосредственно показывающие строение кристаллов.

В кристаллических телах материальные частицы закономерно ориентированы в пространстве и образуют кристаллическую структуру (рис. 1).

В качестве модели внутреннего строения кристаллических тел принята *пространственная (кристаллическая) решетка*.

1.2.1. Пространственная решетка

Пространственная решетка представляет собой совокупность материальных частиц, расположенных в соответствующих точках бесконечного множества параллелепипедов, которые нацело выполняют пространство, будучи равными, параллельно ориентированными и смежными по целым граням (рис. 2).

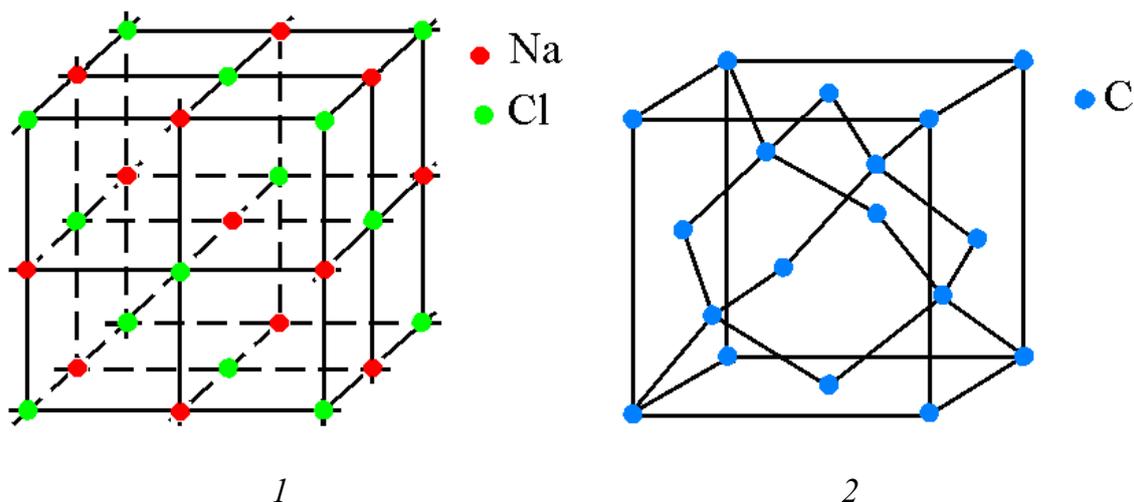


Рис. 1. Структура поваренной соли NaCl (1) и алмаза C (2)

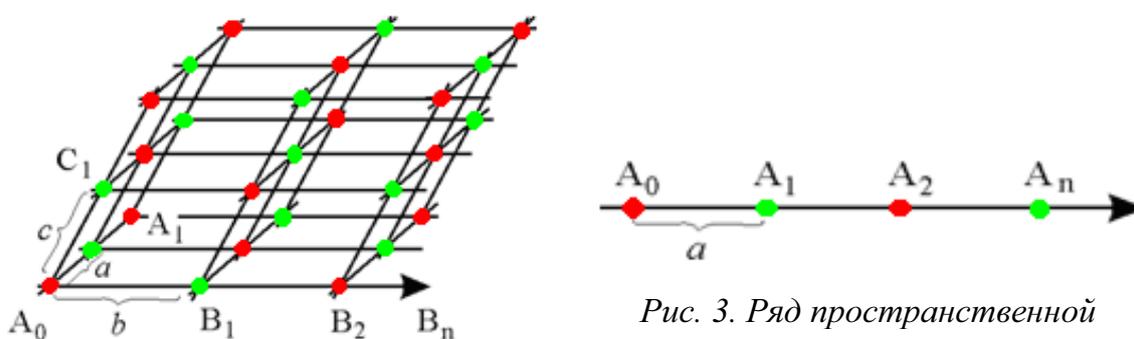


Рис. 2. Пространственная решетка

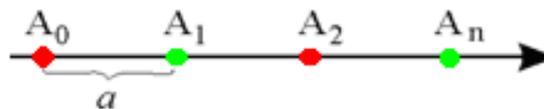


Рис. 3. Ряд пространственной решетки:
a – промежуток ряда

В строении пространственной решетки выделены следующие элементы:

- узлы – материальные частицы, расположенные в определенных точках пространственной решетки (вершины, центры параллелепипедов или их граней);
- ряды – совокупность узлов, расположенных вдоль прямой и повторяющихся через равные промежутки (рис. 3);
- плоская сетка – совокупность узлов, расположенных в одной плоскости и находящихся в вершинах параллелограммов (рис. 4); каждая плоская сетка разбивается двумя сериями параллельных рядов (A_0A_n и A_0B_n) на систему равных и параллельно ориентированных параллелограммов (на рис. 4 соответствующий параллелограмм заштрихован), в частных случаях параллелограммы представлены ромбами, прямоугольниками и квадратами.
- элементарная ячейка – элементарный параллелепипед, закономерная повторяемость которого образует пространственную решетку (рис. 5).

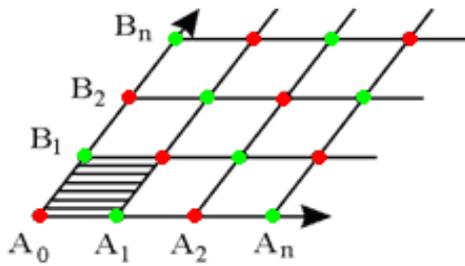


Рис. 4. Плоская сетка

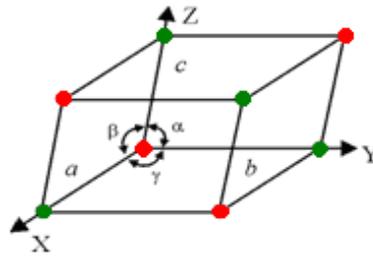


Рис. 5. Элементарная ячейка:
углы α , β , γ , промежутки ряда a , b , c –
параметры элементарной ячейки

Элементарная ячейка характеризуется следующими параметрами: углы (α , β , γ) между направлениями, принятыми за координатные оси (X , Y , Z) и отрезки (a , b , c) – промежутки ряда.

Значения углов α , β , γ и отрезков a , b , c определяют конфигурацию элементарной ячейки. Но эти значения не могут быть произвольными, они подчиняются определенным закономерностям расположения материальных частиц, и если параметры ячейки определяют тип пространственной решетки, то таких типов должно быть конкретное количество. В 1848 году французский кристаллограф О. Бравэ (1811–1863) математическими расчетами доказал, что существует всего 14 типов пространственных решеток (рис. 6). Расчеты строились на том принципе, что узлы пространственной решетки располагаются симметрично, в результате были вычислены 14 возможных конфигураций элементарных ячеек.

На рис. 6 приведены элементарные ячейки 14 типов решеток Бравэ. Ячейки 1, 2, 3, 4, 12 называются *примитивными* (или *пустыми*), поскольку узлы расположены только в их вершинах, форма самих ячеек зависит от соотношения параметров a , b , c и углов α , β , γ . Данные параметры изменяются от варианта $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ (триклинная решетка, рис. 6, 1) с последующими изменениями: $a \neq b \neq c$, $\beta \neq \alpha = \gamma = 90^\circ$ (моноклинная решетка, рис. 6, 2), $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (ромбическая решетка, рис. 6, 3), $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (тетрагональная решетка, рис. 6, 4), $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (кубическая решетка, рис. 6, 12). Кроме пяти примитивных ячеек с узлами в вершинах, возможны варианты с сохранением симметрии, но с дополнительными узлами, например, в центре ячейки (рис. 6, 6, 11, 13). Такие ячейки называются *объемно-центрированными*. Если узлы располагаются в серединах всех граней ячейки (рис. 6, 7, 14), они носят название *гранецентрированных*. Ячейки 3 и 5 – *базоцентрированные*. Кроме 12 разобранных пространственных решеток имеются еще две (рис. 6, 8, 9) – *ромбоэдрическая* и *гексагональная*.

Представителями кристаллических тел являются кристаллы, внутренняя структура которых построена по законам пространственной решетки.

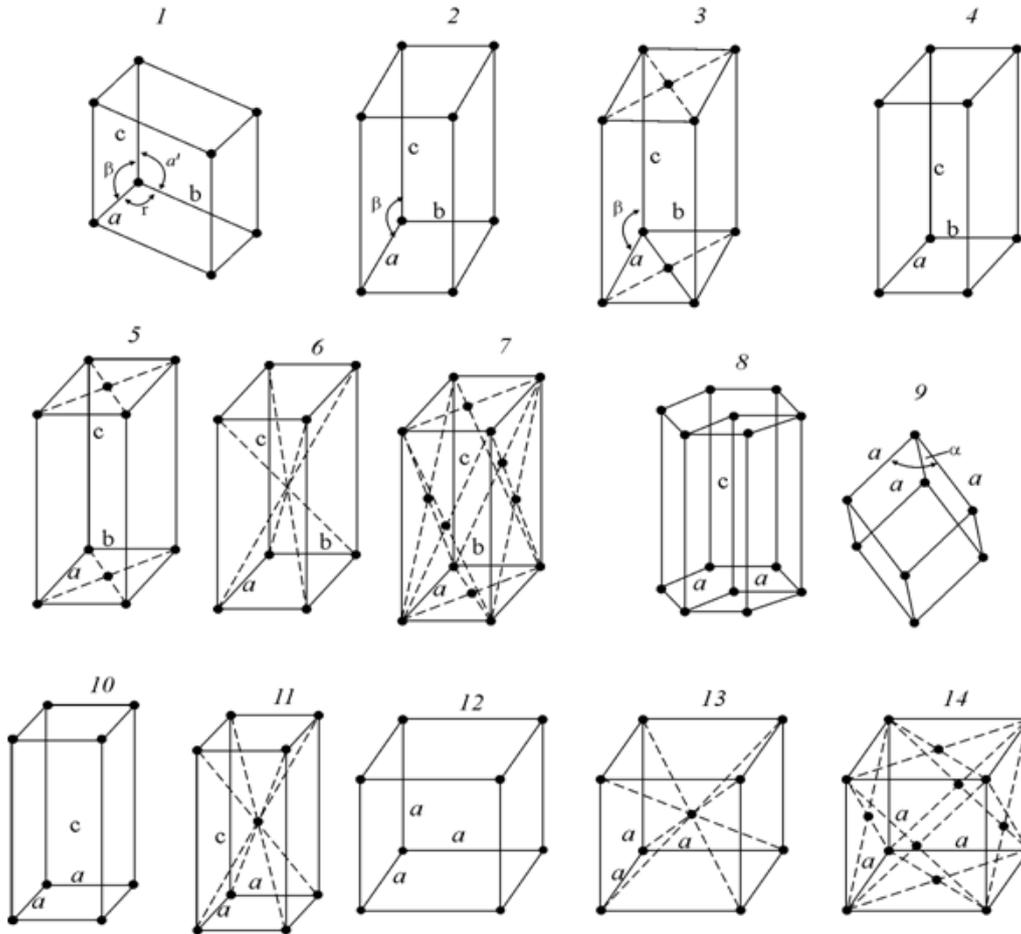


Рис. 6. Четырнадцать типов пространственных решеток

1.2.2. Определение кристалла.

Связь внешней формы кристалла с его внутренним строением

Кристаллом называется твердое тело в форме геометрически правильного многогранника, в котором материальные частицы расположены закономерно в виде пространственной решетки.

Геометрически правильная форма многогранника обусловлена элементами ограничения кристалла – плоскими гранями, ребрами (линии пересечения граней), вершинами (точки пересечения ребер). Количество граней, ребер, вершин кристалла связано между собой формулой Эйлера–Декарта:

$$\text{Грани} + \text{Вершины} = \text{Ребра} + 2.$$

Между внутренним строением кристалла и его внешней формой существует вполне определенная связь: грани кристалла соответствуют плоским сеткам, ребра – рядам пространственной решетки, имеющим наибольшую *ретикулярную плотность*. Под *ретикулярной плотностью* понимается число узлов, приходящихся на единицу площади плоской сетки или единицу длины ряда пространственной решетки.

1.2.3. Основные свойства кристаллов

Закономерное внутреннее строение кристаллов в виде пространственной решетки обуславливает три важнейших их свойства: однородность, анизотропность, способность самоограняться.

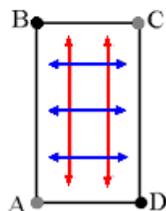


Рис. 7. Одинаковые свойства кристалла в направлениях, параллельных AB и BC

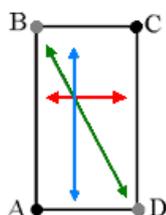


Рис. 8. Различные свойства кристалла в направлениях BD, BC и AB

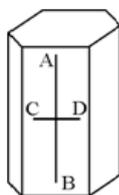


Рис. 9. Кристалл дистена с различной твердостью в направлениях AB и CD

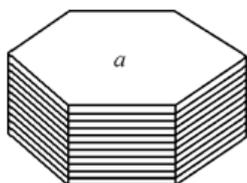


Рис. 10. Кристалл слюды легко расщепляется в направлении, параллельном грани a

Под *однородностью* понимаются одинаковые свойства кристалла в параллельных направлениях (рис. 7). *Анизотропность* проявляется в различных свойствах кристалла в непараллельных направлениях (рис. 8).

У природных кристаллов однородность обычно нарушается различными включениями или дефектами кристаллов. Свойство анизотропности кристаллов наблюдается постоянно. Одним из ярких примеров анизотропности служит минерал дистен $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{O}$, кристаллы которого имеют резко различную твердость по разным направлениям (рис. 9): острое иглы или лезвие ножа оставляют царапину вдоль удлинения кристалла (направление AB), в перпендикулярном к нему направлении CD царапины не остается. Другой пример анизотропности – кристаллы слюды: кристалл легко расщепляется на отдельные пластинки по плоскостям, параллельным грани *a* (рис. 10), в поперечном направлении расщепить пластины слюды значительно сложнее.

Следует заметить, отдельные свойства кристаллов могут быть изотропными. Таковыми, например, являются оптические, тепловые свойства у кристаллов кубической сингонии.

Способность самоограняться заключается в том, что при благоприятных условиях роста кристалл образует форму правильного многогранника.

2. СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ

Слово «симметрия» в переводе с греческого языка означает соразмерность. Явление симметрии широко развито в царстве живой природы (лепестки и листья различных цветов и растений, крылья бабочек и птиц, наконец, человек). В неживой природе яркими представителями симметричных тел являются кристаллические многогранники, которые, по выражению величайшего русского кристаллографа Е.С. Федорова, «блещут своей симметрией». В отличие от симметричных тел живой природы, симметрия кристаллов обязана их внутренней структуре, в которой материальные частицы закономерно ориентированы. Внутренняя симметрия кристаллов, следовательно, проявляется на их внешней форме.

Под *симметрией кристаллов* понимается *закономерная повторяемость одинаковых граней, ребер и вершин относительно некоторых вспомогательных геометрических образов (прямая линия, плоскость, точка)*. Вспомогательные геометрические образы, с помощью которых обнаруживается симметрия кристалла, называются *элементами симметрии*.

2.1. Элементы симметрии кристаллов

К элементам симметрии кристалла относятся ось симметрии, плоскость симметрии, центр симметрии. В современной кристаллографической литературе приняты следующие символы для их обозначения: ось симметрии – L , плоскость симметрии – P , центр симметрии – C .

2.1.1. Ось симметрии

Осью симметрии (L) называется прямая линия, при повороте вокруг которой на 360° кристалл несколько раз совмещается со своим исходным положением.

Угол, при повороте на который происходит совмещение кристалла с исходным положением, называется *элементарным углом поворота*. Он имеет вполне определенное значение: 180° , 120° , 90° , 60° . Следовательно, число повторений одинаковых элементов ограничения кристалла при вращении его на 360° может быть равным 2, 3, 4, 6.

Число совмещений кристалла со своим исходным положением при вращении на 360° называется *порядком оси симметрии*. В кристалле возможны оси симметрии второго, третьего, четвертого и шестого порядков. Порядок осей симметрии обозначается следующими символами: L_2 , L_3 , L_4 , L_6 . Количество осей одного и того же порядка указывается ко-

эффицентом перед символом оси симметрии. Например, $3L_4$ – читается: три оси симметрии четвертого порядка.

Таким образом, подчеркнем, в кристаллах оси симметрии пятого порядка и выше шестого не существуют. Оси первого порядка не отмечаются, так как они имеются в любом многограннике. Возможное количество осей симметрии одного и того же порядка следующее: $L_2 - 0, 1, 2, 3, 4, 6$; $L_3 - 0, 1, 4$; $L_4 - 0, 1, 3$; $L_6 - 0, 1$.

Оси симметрии могут выходить в центре граней, в середине ребер и в вершинах многогранных углов (рис. 11).

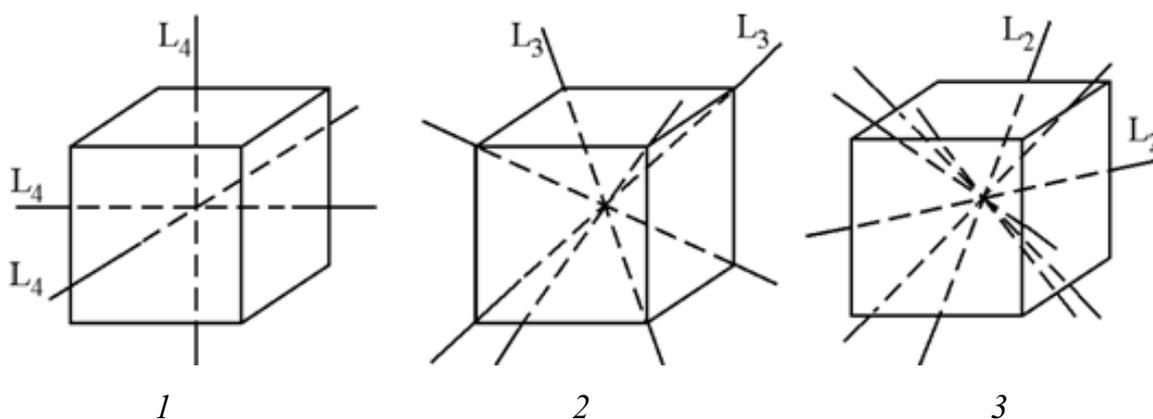


Рис. 11. Выход осей симметрии в кубе:

$3L_4$ – в центре противоположных граней (1); $4L_3$ – в противоположных вершинах трехгранных углов (2); $6L_2$ – в середине противоположных ребер (3)

2.1.2. Плоскость симметрии

Плоскостью симметрии (P) называется такая плоскость, которая делит кристалл на две зеркально-равные части. Плоскость симметрии представляется как двухстороннее зеркало, в котором одна половина кристалла путем отражения совмещается со второй.

Для того чтобы произвести отражение, необходимо из каждой точки грани, например из точки A и B (рис. 12), опустить на плоскость симметрии (P) перпендикуляры (Aa , Bb) и продолжить эти перпендикуляры на равные расстояния. Таким образом, точка A совместится с точкой A_1 и точка B – с точкой B_1 ; отражение прямой AB совместится с прямой A_1B_1 . На рис. 13 изображена грань кристалла в виде прямоугольника $ABCD$, который рассечен плоскостями симметрии P_1 и P_2 , проходящими параллельно его сторонам. Диагональ AC (рис. 14) делит прямоугольник на два равных треугольника, но не является плоскостью симметрии, т. к. треугольники ADC и ABC не имеют зеркального равенства.

Плоскости симметрии проходят перпендикулярно к граням и ребрам (через их середины) и вдоль ребер. В кристаллах они могут

отсутствовать или их число равно 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9. Подчеркнем, восемь плоскостей симметрии и более чем девять в кристаллах невозможны. Например, в кубе число плоскостей симметрии – 9, из которых $3P$ – проходят перпендикулярно ребрам и граням кристалла, через их середины (рис. 15, 1), $6P$ – вдоль ребер, по диагоналям квадратных граней (рис. 15, 2).

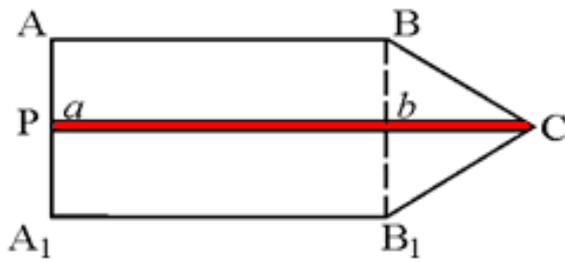


Рис. 12. Плоскость P делит грань на две зеркально-равные части

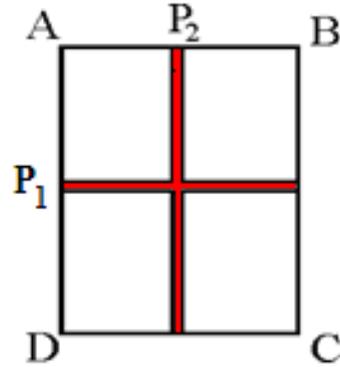


Рис. 13. P_1 и P_2 – плоскости симметрии грани $ABCD$

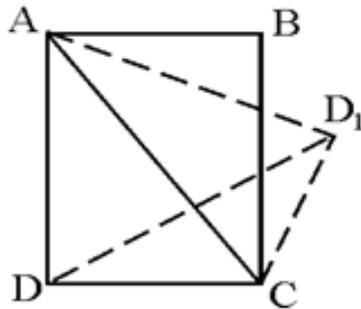


Рис. 14. Диагональ AC грани $ABCD$ не является плоскостью симметрии

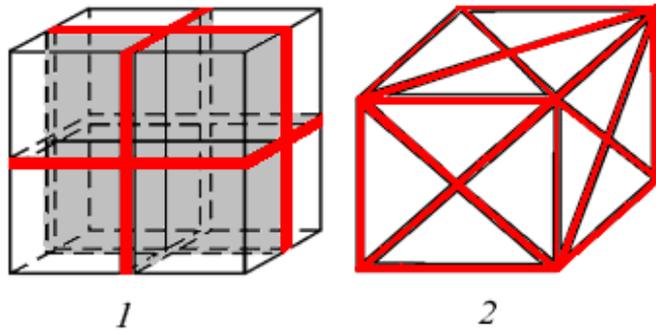


Рис. 15. Плоскости симметрии в кубе: $3P$ проходят перпендикулярно ребрам и граням (1); $6P$ – вдоль ребер и по диагоналям квадратной грани (2)

2.1.3. Центр симметрии

Центр симметрии (C) – точка внутри кристалла, в которой пересекаются и делятся пополам линии, соединяющие противоположные одинаковые грани, ребра или вершины кристалла. Из данного определения следует правило: если в кристалле центр симметрии имеется, то каждая грань его должна иметь себе противоположную равную, параллельную и обратно направленную грань. Например, в кубе, квадратной призме C имеется, в тетраэдре – отсутствует, т. к. каждой грани его соответствует противоположная вершина (рис. 16).

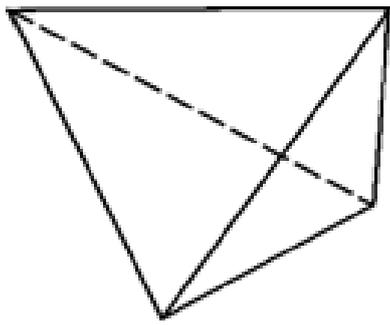


Рис. 16. Тетраэдр не имеет центра симметрии; каждой грани его соответствует противоположная вершина

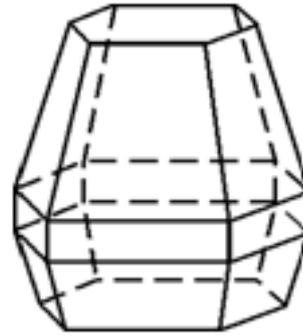


Рис. 17. Центр симметрии отсутствует; не все попарно параллельные грани равны друг другу

Для определения наличия центра симметрии существует следующий практический прием. Кристалл кладем на грань на какую-нибудь горизонтальную поверхность (например, на стол), и если ей соответствует противоположная равная, параллельная и обратно направленная грань, то центр симметрии возможен; если на кристалле хотя бы одна из граней не имеет себе противоположную равную, параллельную и обратно направленную грань, то центр симметрии отсутствует (рис. 17).

Таким образом, каждый кристаллический многогранник может содержать один какой-либо из элементов симметрии или совокупность нескольких элементов симметрии. Сочетание нескольких элементов симметрии в кристалле не может быть произвольным и подчиняется строгой геометрической закономерности.

Совокупность всех имеющихся элементов симметрии принято записывать в строчку, без каких-либо знаков препинания между ними, при этом вначале указываются оси симметрии, начиная с высшего порядка, затем плоскости симметрии и на последнем месте, если имеется, записывается центр симметрии. Например, элементы симметрии куба: $3L_44L_36L_29PC$; тетрагональной призмы: L_44L_25PC ; гексагональной призмы: L_66L_27PC ; тетраэдра: $4L_33L_26P$.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ

Кристаллы по совокупности в них элементов симметрии объединяются в *классы*. Например, класс симметрии куба – $3L_44L_36L_29PC$; тетраэдра – $4L_33L_26P$. Всего в результате различных комбинаций элементов симметрии в кристаллах выделено 32 класса. В один класс отнесены кристаллы, обладающие одинаковым набором элементов симметрии. Классы объединяются в сингонии. В одну сингонию сгруппированы классы, характеризующиеся одним или несколькими одинаковыми элементами симметрии. Таких сингоний известно 7: *кубическая, тетрагональная, гексагональная, тригональная, ромбическая, моноклинная, триклинная*. По степени симметричности сингонии объединяются в более крупные подразделения – *категории*: высшая, средняя, низшая. Характеристика сингоний и категорий приведена в табл. 1.

Таблица 1

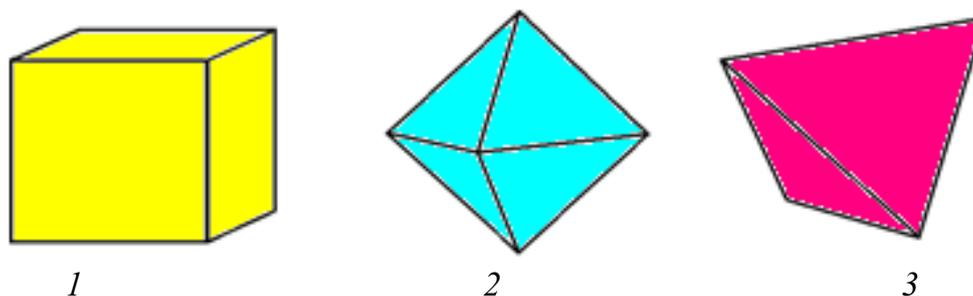
Характеристика сингоний и категорий

<i>Сингония</i>	<i>Количество классов</i>	<i>Типоморфные совокупности элементов симметрии</i>	<i>Категория</i>
Кубическая	5	$4L_3$	Высшая. Несколько осей симметрии выше второго порядка
Тетрагональная	7	L_4	Средняя. Одна ось симметрии выше второго порядка
Гексагональная	7	L_6	
Тригональная	5	L_3	
Ромбическая	3	Сумма осей симметрии второго порядка и плоскостей симметрии равна 6 или 3: $3L_23PC; L_22P$	Низшая. Нет осей симметрии выше второго порядка
Моноклинная	3	Сумма осей симметрии второго порядка и плоскостей симметрии равна 2 или 1: $L_2PC; L_2$	
Триклинная	2	Нет элементов симметрии или имеется центр симметрии – C	

4. ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ

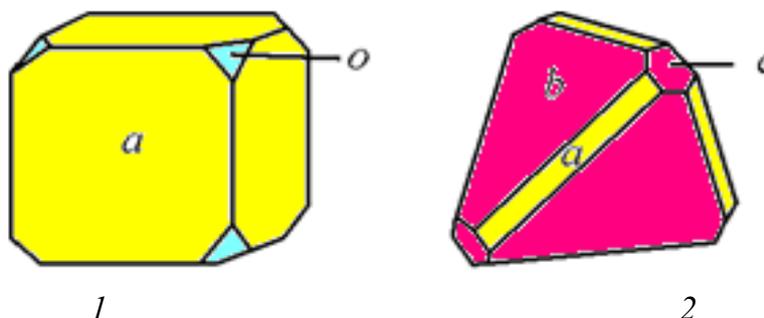
Форму кристалла образует совокупность всех его граней. Среди кристаллов выделены две группы форм: 1 – простая форма; 2 – комбинация простых форм (сложная форма).

Простой формой называется кристалл, который состоит из одинаковых по величине и очертанию граней, имеющих симметричное расположение (рис. 18).



*Рис. 18. Простые формы кристаллов:
1 – гексаэдр (куб); 2 – октаэдр; 3 – тетраэдр*

Комбинацией простых форм (сложной формой) называется кристалл, который состоит из граней, различающихся по величине или очертанию. В комбинации участвует столько простых форм, сколько разновидностей граней (рис. 19).



*Рис. 19. Комбинации простых форм:
1 – гексаэдр (a), октаэдр (o); 2 – гексаэдр (a), два тетраэдра (b, c)*

Среди простых форм различают формы *закрытые* и *открытые*. К закрытым относятся простые формы, замыкающие пространство, все грани их одинаковые. Например, на рис. 18 гексаэдр, октаэдр, тетраэдр – закрытые формы. Открытые простые формы не замыкают пространство, и они всегда находятся в комбинации с другими простыми формами. Примеры открытых форм представляют призмы, закрывающиеся двумя параллельными гранями, пирамиды, закрытые одной гранью (рис. 20).

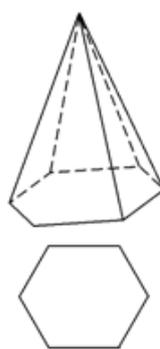
ромбическая пирамида



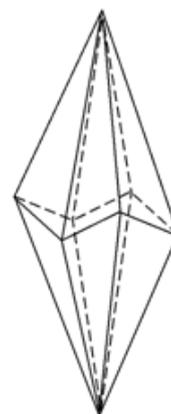
тетрагональная пирамида



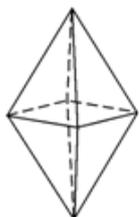
гексагональная пирамида



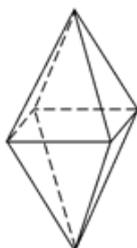
тригональный скаленоэдр



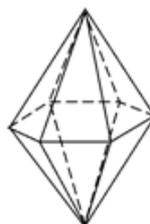
ромбическая дипирамида



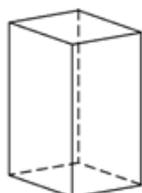
тетрагональная дипирамида



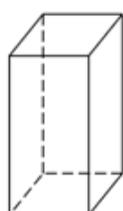
гексагональная дипирамида



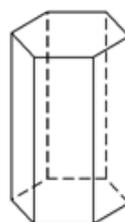
ромбическая призма



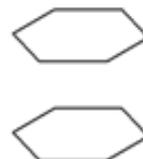
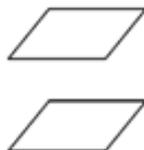
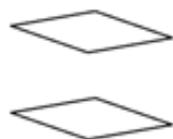
тетрагональная призма



гексагональная призма



пинакоид



диэдр



Рис. 20. Формы кристаллов

ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ

КУБИЧЕСКАЯ СИНГОНΙΑ



ТЕТРАГОНАЛЬНАЯ СИНГОНΙΑ



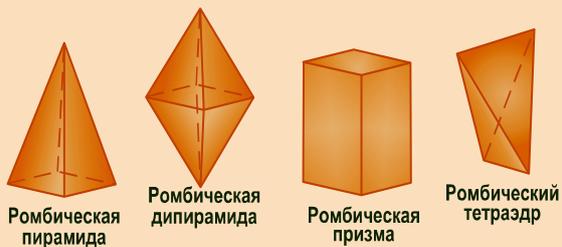
ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ СИНГОНΙΑ



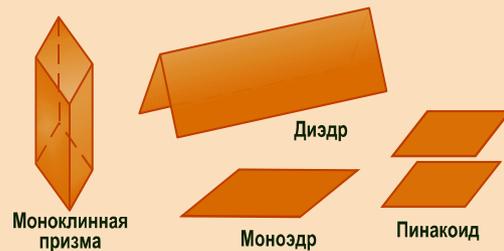
ТРИГОНАЛЬНАЯ СИНГОНΙΑ



РОМБИЧЕСКАЯ СИНГОНΙΑ



МОНОКЛИННАЯ СИНГОНΙΑ



4.1. Номенклатура простых форм

В основу названия простых форм положено несколько признаков: число граней, очертание грани, сечение формы. В номенклатуре простых форм кристаллов используются греческие термины, наиболее часто употребляемые из которых следующие:

<i>моно</i>	– одно-, единственный;	<i>додека</i>	– двенадцать-, двенадцати;
<i>ди, би</i>	– дву-, дважды;	<i>эдра</i>	– грань;
<i>три</i>	– три-, трех-, трижды;	<i>гонио</i>	– угол;
<i>тетра</i>	– четыре-, четырех-, четырежды;	<i>син</i>	– сходно;
<i>пента</i>	– пяти-, пятью;	<i>пинакос</i>	– таблица, доска;
<i>гекса</i>	– шести-, шестью;	<i>клинэ</i>	– наклон;
<i>окта</i>	– восьми-, восемью;	<i>поли</i>	– много;
		<i>скаленос</i>	– косой, неровный.

Таким образом, используя приведенную греческую терминологию, рассмотрим примеры сложения названий простых форм. Куб состоит из шести одинаковых граней – *гексаэдр*, восьмигранник – *октаэдр*; четырехгранник – *тетраэдр*; две одинаковые пирамиды, сложенные основаниями, образуют *дипирамиду*; кристалл, ограниченный гранями в виде косоугольных треугольников, носит название *скаленоэдр*; форма из двух параллельных граней называется *пинакоидом*, из двух пересекающихся – *диэдром*; форма, представленная одной гранью, называется *моноэдром* (рис. 20).

5. СИСТЕМЫ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОСЕЙ

Для определения положения граней кристалла в пространстве в кристаллографии, как и в начертательной геометрии, пользуются системами координатных осей. *Направления в кристалле, параллельные его ребрам и принятые за координатные оси, называются кристаллографическими осями.* Обозначения осей следующие: первая ось I (X), конец ее, направленный к наблюдателю, считается положительным, противоположный – отрицательным; вторая ось II (Y), ее положительный конец направлен вправо от наблюдателя, отрицательный – влево; третья ось III (Z), верхний ее конец принимается за положительный, нижний – за отрицательный. Направления кристаллографических осей совпадают с рядами пространственной решетки или параллельны им. В связи с этим в литературе нередко кристаллографические оси I, II, III отождествляют с осевыми отрезками a , b , c , соответствующими промежуткам ряда пространственной решетки.

В зависимости от симметрии кристаллов используются следующие системы кристаллографических осей (КО).

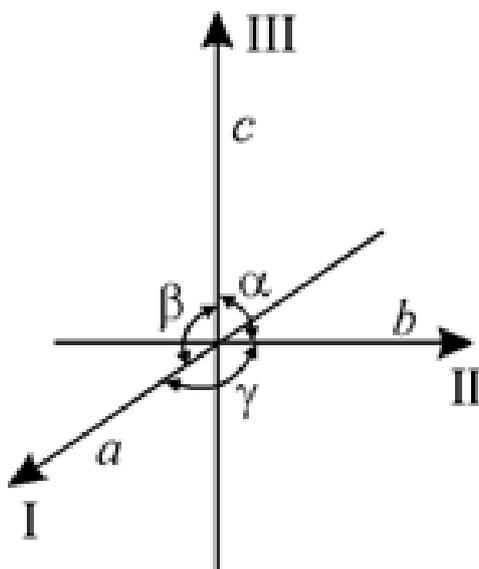


Рис. 21. Прямоугольная система КО: $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

1. Прямоугольная (ортогональная) трехосная система КО. Применяется в кристаллах кубической, тетрагональной и ромбической сингоний (рис. 21). Осевые отрезки a , b , c в каждой сингонии различаются (рис. 22).

2. Четырехосная система КО. Используется для установки кристаллов гексагональной и тригональной сингоний. Четвертая ось (IV) –

вертикальная, три другие – находятся в плоскости, перпендикулярной IV оси, положительные концы их принимаются чередуясь между собой через 120° , при этом отрицательный конец III оси направлен к наблюдателю (рис. 23, 24).

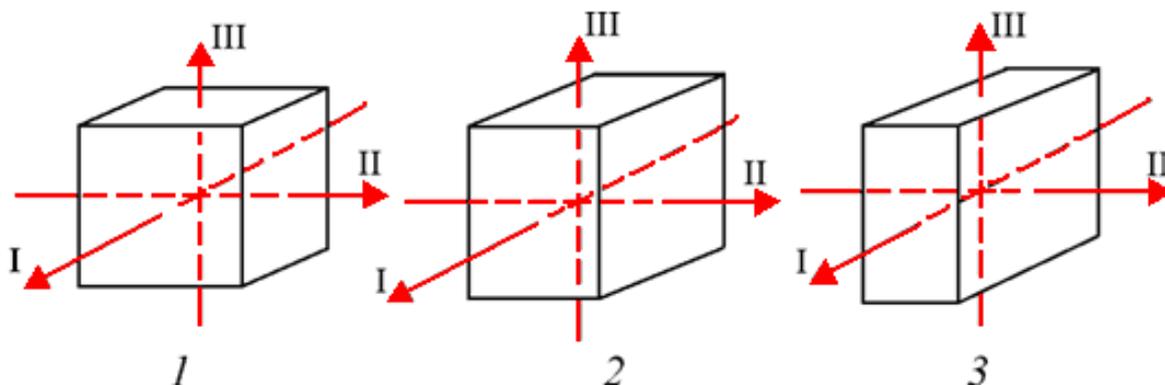


Рис. 22. Установка кристаллов в прямоугольной системе КО:
 1 – кубическая сингония ($a = b = c$); 2 – тетрагональная сингония ($a = b \neq c$);
 3 – ромбическая сингония ($a \neq b \neq c$)

3. Наклонная (моноклинная) система КО. Используется для установки кристаллов моноклинной сингонии. III ось – вертикальная, I – наклонена к наблюдателю под тупым углом, проводится параллельно наклонному ребру кристалла, II – горизонтальная (рис. 25, 26).

4. Косоугольная (триклинная) система КО. Применяется для установки кристаллов триклинной сингонии. I, II, III оси проводятся параллельно наиболее развитым ребрам кристалла (рис. 27, 28).

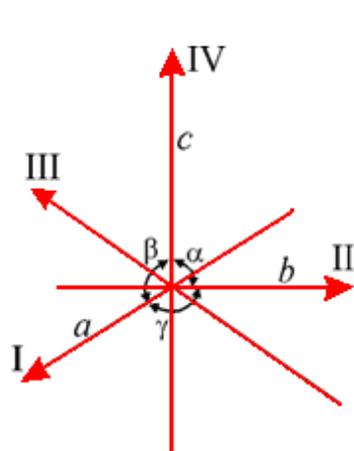


Рис. 23. Четырехосная система КО:
 $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$;
 $a = b \neq c$

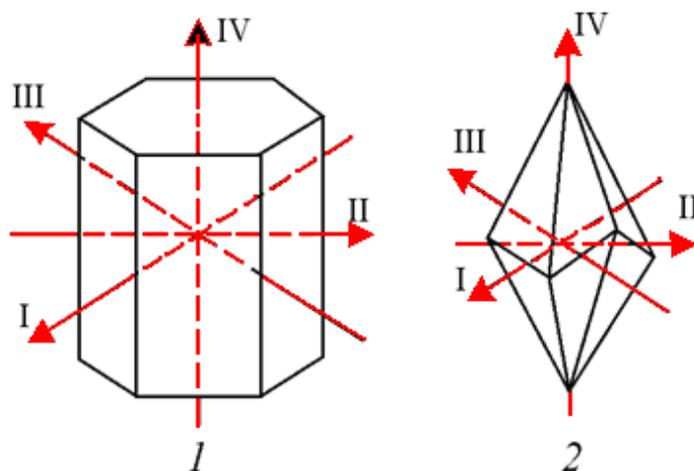


Рис. 24. Установка кристаллов в четырехосной системе КО:
 1 – гексагональная сингония;
 2 – тригональная сингония

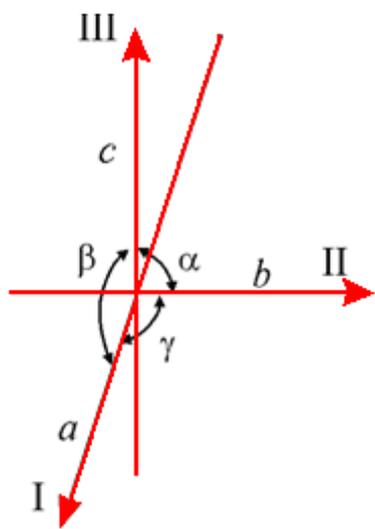


Рис. 25. Наклонная система КО:
 $\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ; a \neq b \neq c$

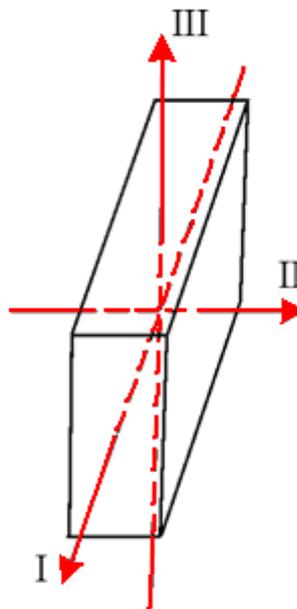


Рис. 26. Установка кристаллов
 в наклонной системе КО

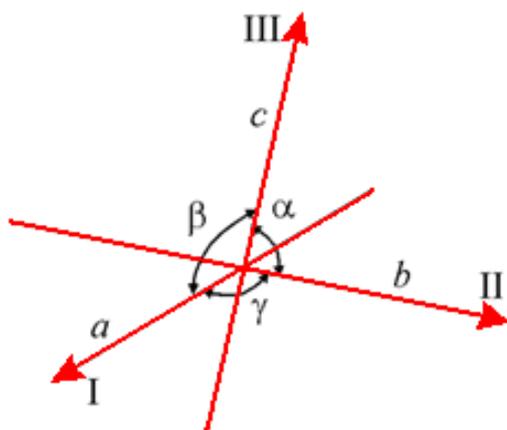


Рис. 27. Косоугольная система КО:
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ; a \neq b \neq c$

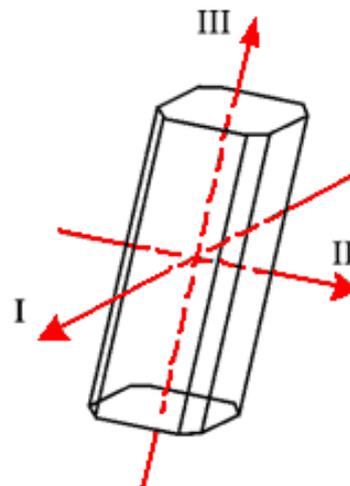


Рис. 28. Установка кристалла
 в косоугольной системе КО

5.1. Закон целых чисел

Знание элементов симметрии и простых форм не всегда помогает однозначно определить простую форму в комбинации, так как очертания ее граней часто изменены (рис. 19).

Следовательно, для определения простой формы в комбинации необходимо выяснить взаимное расположение граней кристалла относительно кристаллографических осей и вычислить их символы.

Понятие о символах основано на важнейшем законе кристаллографии – законе целых чисел, являющемся следствием закономерного

строения пространственной решетки. Закон имеет несколько названий: закон целых чисел, закон рациональности двойных отношений, закон рациональности отношений параметров, закон Аюи (по имени французского ученого, его открывшего).

Закон заключается в следующем.

В кристалле выделяем три непараллельных ребра, пересекающихся в точке O , и принимаем их за кристаллографические оси: OI , OII , $OIII$. Затем в том же кристалле выбираем две непараллельные грани $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$, пересекающие все три ребра. Отрезки, отсекаемые гранями на ребрах кристалла, принятых за кристаллографические оси, называются параметрами грани. Следовательно, OA_1 , OB_1 , OC_1 – параметры грани $A_1B_1C_1$; OA_2 , OB_2 , OC_2 – параметры грани $A_2B_2C_2$ (рис. 29).

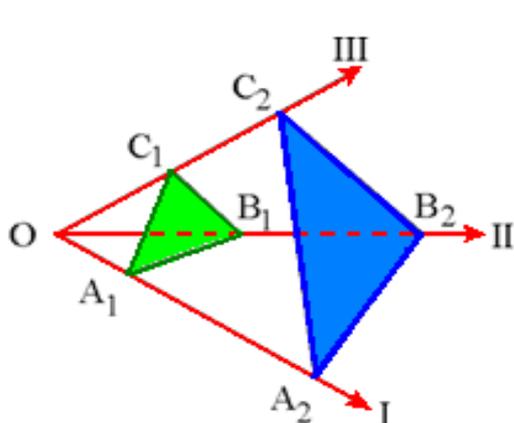


Рис. 29. Три непараллельных ребра, принятые за кристаллографические оси, и параметры граней $A_1B_1C_1$ (OA_1 , OB_1 , OC_1), $A_2B_2C_2$ (OA_2 , OB_2 , OC_2)

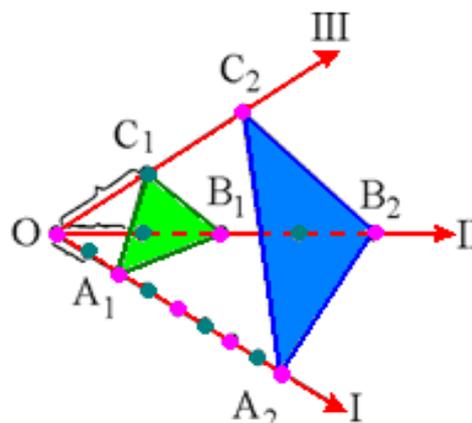


Рис. 30. Ребра OI , OII , $OIII$ – ряды пространственной решетки; грани $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ – плоские сетки

Возьмем отношение отрезков, которые отсекают эти грани на ребрах, и затем отношение этих отношений, т. е. двойные отношения: $\frac{OA_2}{OA_1} : \frac{OB_2}{OB_1} : \frac{OC_2}{OC_1}$. Сократив эти двойные отношения и приведя к общему знаменателю, получаем целые числа, т. е.

$\frac{OA_2}{OA_1} : \frac{OB_2}{OB_1} : \frac{OC_2}{OC_1} = p:q:r$,

где p , q , r – целые числа. Целыми числа могут получиться только в том случае, если числители и знаменатели во взятых отношениях тоже целые или рациональные числа. Такова сущность закона целых чисел, и формулировка его следующая: двойные отношения параметров, отсекаемых двумя любыми гранями кристалла на трех пересекающихся ребрах его, равны отношениям целых и сравнительно малых чисел. Объяснение причин отношений отрезков, представляющих собой целые и рациональные числа, находится в законе решетчатого строения кри-

сталла: плоские сетки, пересекающие данные ряды, проходят через соответствующие узлы этих рядов и отсекают на них целое число промежутков (рис. 30).

5.2. Символы граней

Для определения символов граней необходимо установить кристалл в систему кристаллографических осей в соответствии с сингонией и классом симметрии кристалла и выбрать единичную грань. *Под единичной гранью понимается грань кристалла, параметры которой по каждой кристаллографической оси приняты за единицы измерения (масштабные отрезки)*. Например, на рис. 29 грань $A_1B_1C_1$ – единичная грань, а отсекаемые ею отрезки на кристаллографических осях (OA_1 , OB_1 , OC_1) приняты за единицы измерения по осям I, II, III. Измерим параметры заданной грани $A_2B_2C_2$ принятыми единицами измерения единичной грани, для чего разделим параметры грани $A_2B_2C_2$ на параметры грани $A_1B_1C_1$. Получаем количество единичных отрезков, отсекаемое гранью $A_2B_2C_2$, на каждой оси. По оси I число единичных отрезков равно $\frac{OA_2}{OA_1}$, по оси II – $\frac{OB_2}{OB_1}$, по оси III – $\frac{OC_2}{OC_1}$. Берем отношение полученных величин, приведем его к общему знаменателю и отбросим последний: $\frac{OA_2}{OA_1} : \frac{OB_2}{OB_1} : \frac{OC_2}{OC_1} = p:q:r$. Следовательно, отношения параметров ($p:q:r$) определяют положение грани в кристаллографических осях. Однако для числовой характеристики грани удобнее использовать индексы. *Индексы – величины, обратные параметрам: $\frac{1}{p} : \frac{1}{q} : \frac{1}{r} = h:k:l$* , где h, k, l – целые и взаимно простые числа. Индексы, таким образом, представляют три числа, составляющие символ грани. Индексы принято заключать в круглые или фигурные скобки, без каких-либо разделительных знаков между ними: (hkl) , $\{hkl\}$. Индексы, заключенные в круглые скобки, определяют положение в кристаллографических осях одной конкретной грани, в фигурные скобки – характеризуют простую форму в целом. Знак минус, стоящий над индексом, например $\{h\bar{k}l\}$, означает символ грани, пересекающей II ось в отрицательном направлении.

Индексы граней могут иметь как буквенное выражение, так и цифровое. Например, $\{hkk\}$, $\{211\}$, $\{110\}$. Символ грани с цифровыми индексами не следует понимать как «двести одиннадцать» или «сто десять», а читается: два-один-один или один-один-ноль. Ноль в символе указывает, что грань параллельна данной кристаллографической оси, например $\{110\}$ – грань параллельна III оси.

6. СИСТЕМАТИКА КРИСТАЛЛОВ

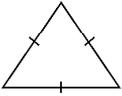
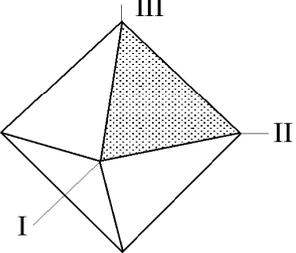
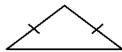
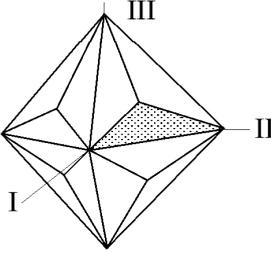
В кристаллографии известно 47 простых форм, среди которых 15 принадлежат наиболее высокосимметричной кубической сингонии, 25 – тетрагональной, гексагональной и тригональной сингониям; минимальное число простых форм – 7, объединяют низкосимметричные сингонии: ромбическую, моноклинную, триклинную. В данном пособии приводится обзор лишь тех простых форм кристаллов, которые чаще встречаются при изучении минералов. Простые формы кристаллов 7 сингоний, их установка в системе кристаллографических осей, параметры и индексы приведены в табл. 2–9.

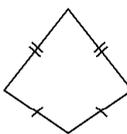
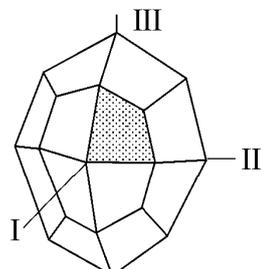
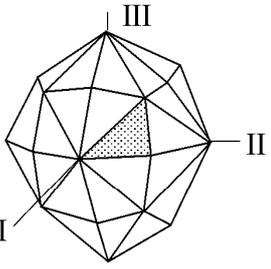
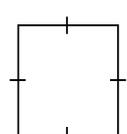
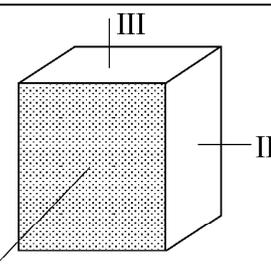
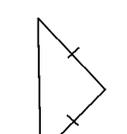
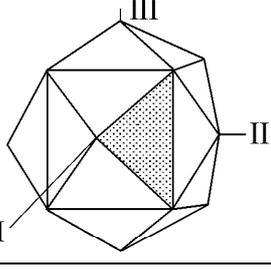
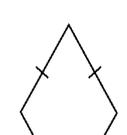
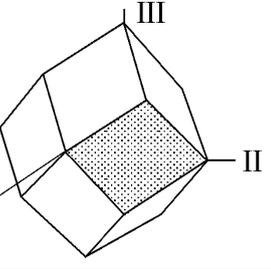
6.1. Кубическая сингония ($4L_3$)

Кристаллы характеризуются изометрической формой. Для определения параметров и индексов простой формы используется прямоугольная система КО, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, единичная грань по I, II, III КО отсекает равные отрезки $a = b = c$ (рис. 21, 22). Установка кристаллов в КО: оси I, II, III совмещаются с $3L_4$ (гексоктаэдрический класс) или с $3L_2$ (гексоктаэдрический, дидодекаэдрический классы). Параметры и индексы могут иметь как буквенные обозначения, так и цифровые. Например, параметры грани – $a:am:na$, индексы – $\{hkl\}$, где $a < am < na$ и, соответственно, $h > k > l$; вариант цифровой записи: параметры – 2:3:6, индексы – $\{321\}$.

Таблица 2

Простые формы
Гексоктаэдрический класс – $3L_44L_36L_29PC$

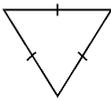
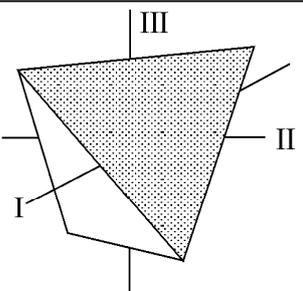
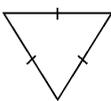
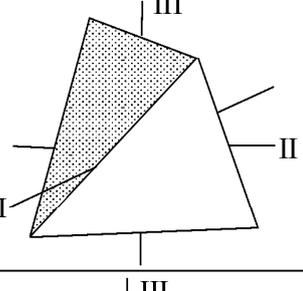
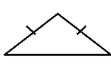
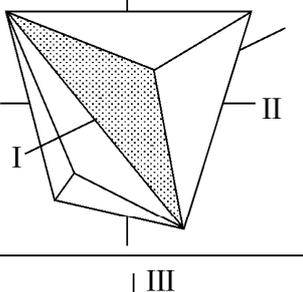
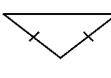
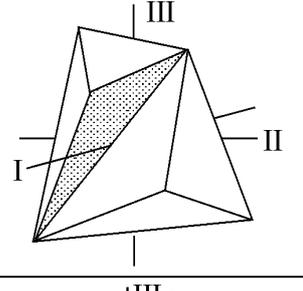
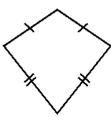
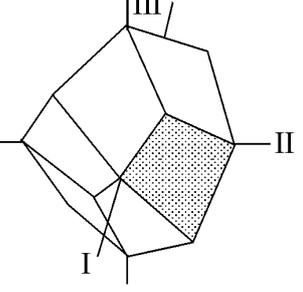
Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
8		Октаэдр	$a:a:a$	$\{111\}$	
24		Тригонтриоктаэдр	$a:a:na$	$\{hhl\}$	

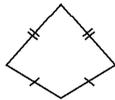
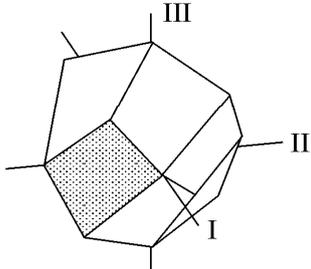
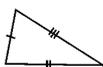
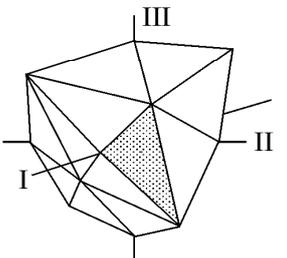
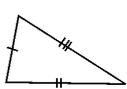
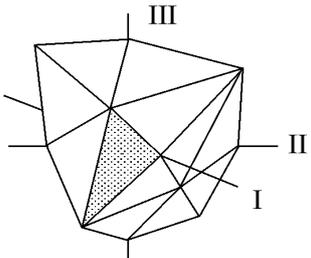
Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
24		Тетрагонтриоктаэдр	$a:ma:ma$	$\{hkk\}$	
48		Гексоктаэдр	$a:ma:na$	$\{hkl\}$	
6		Гексаэдр	$a:\infty a:\infty a$	$\{100\}$	
24		Тетрагексаэдр	$a:ma:\infty a$	$\{hk0\}$	
12		Ромбододекаэдр	$a:a:\infty a$	$\{110\}$	

Примечание. Здесь и в последующих таблицах штриховкой обозначена основная грань, принятая для определения параметров и индексов простой формы.

Таблица 3

Простые формы
Гексатетраэдрический класс – $4L_33L_26P$

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
4		Тетраэдр + (положительный)	$a:a:a$	$\{111\}$	
4		Тетраэдр – (отрицательный)	$a:\bar{a}:a$	$\{1\bar{1}1\}$	
12		Тригонритетраэдр + (положительный)	$a:ma:ma$	$\{hkk\}$	
12		Тригонритетраэдр – (отрицательный)	$a:m\bar{a}:ma$	$\{h\bar{k}k\}$	
12		Тетрагонритетраэдр + (положительный)	$a:a:na$	$\{hhl\}$	

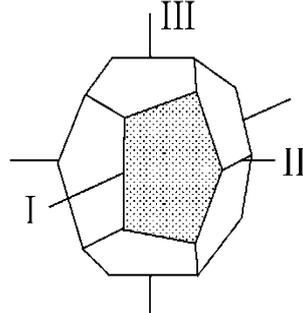
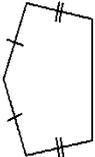
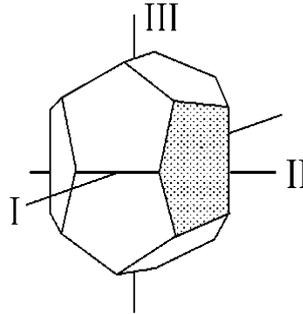
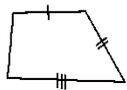
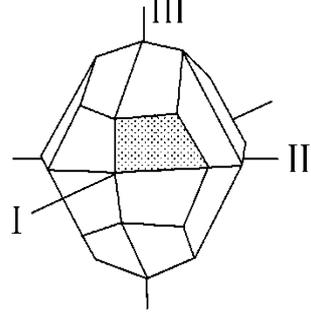
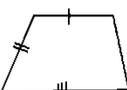
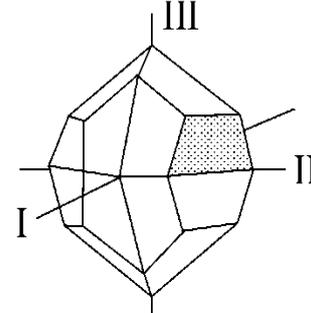
Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
12		Тетрагонритетраэдр – (отрицательный)	$a:\bar{a}:na$	$\{hhl\}$	
24		Гексатетраэдр + (положительный)	$a:ma:na$	$\{hkl\}$	
24		Гексатетраэдр – (отрицательный)	$a:m\bar{a}:na$	$\{h\bar{k}l\}$	

Номенклатура простых форм кубической сингонии в основе имеет два принципа: 1) число граней; 2) производные формы, полученные путем усложнения граней от нескольких исходных простейших форм. К таковым исходным формам относятся октаэдр и тетраэдр – соответственно восемь и четыре грани в виде равносторонних треугольников, гексаэдр – шесть граней в форме квадратов, пентагондодекаэдр – двенадцать пятиугольных граней. Вывод производных форм можно представить следующими построениями. Каждую грань октаэдра мысленно разрезаем отрезками (высотами или биссектрисами) и приподнимаем центр грани (выход L3). В результате появляются треугольники, количество которых на грани октаэдра шесть (тригон-гекса-октаэдр), три (тригон-три-октаэдр) или три четырехугольника (тетрагон-три-октаэдр). Аналогично выводятся производные формы тетраэдра. Подобными построениями нетрудно получить производную форму гексаэдра (куба) – тригон-тетрагексаэдр (или пирамидальный куб), ограниченный 24 гранями в форме равнобедренного треугольника, а также

дидодекаэдр (24 грани в форме трапеции) – представляет собой преломленные пятиугольные грани пентагондодекаэдра (рис. 31).

Таблица 4

Простые формы
Дидодекаэдрический класс – $4L_33L_23PC$

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
12		Пентагондодекаэдр + (положительный)	$a:ma:\infty a$	$\{hk0\}$	
12		Пентагондодекаэдр – (отрицательный)	$ma:a:\infty c$	$\{kh0\}$	
24		Дидодекаэдр + (положительный)	$a:ma:na$	$\{hkl\}$	
24		Дидодекаэдр – (отрицательный)	$ma:a:na$	$\{khl\}$	

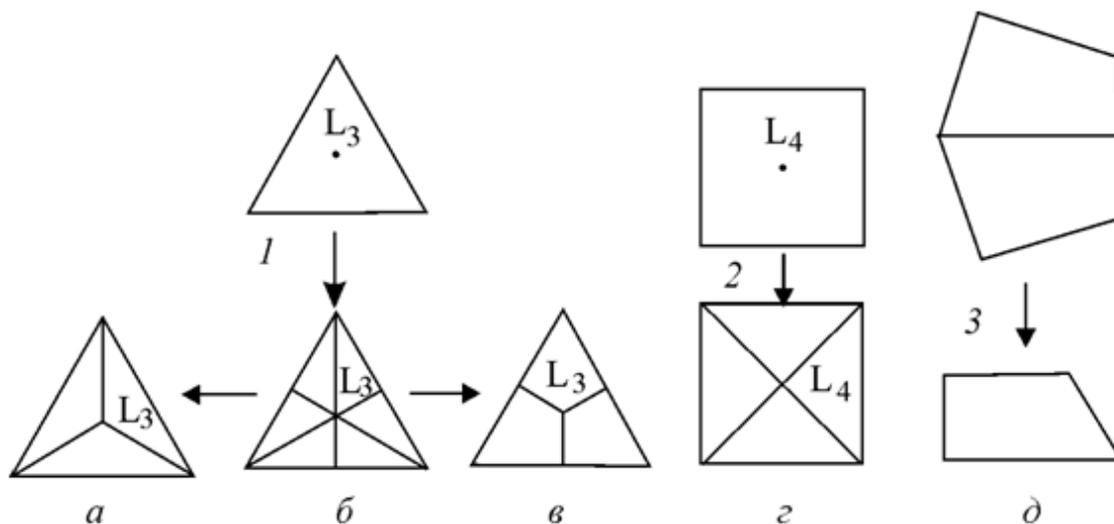


Рис. 31. Вывод производных форм октаэдра (1), гексаэдра (2), пентагондодокаэдра (3):
a – грани тригонтриоктаэдра; *б* – гексоктаэдра;
в – тетрагонтриоктаэдра, *г* – тетрагексаэдра, *д* – дидодокаэдра

6.2. Тетрагональная сингония (L_4)

Кристаллы вытянутые или уплощенные по оси L_4 , сечение перпендикулярно L_4 – четырехугольное (тетрагон) или восьмиугольное с углами, равными через один (дитетрагон). Для определения параметров и индексов простой формы используется прямоугольная система КО, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, единичная грань по горизонтальным I и II КО отсекает равные отрезки $a = b$, по вертикальной III КО – измеряется параметром c , т. е. $a = b \neq c$. Установка кристаллов в КО: оси I, II совмещаются с любыми взаимно перпендикулярными $2L_2$, III – с L_4 . Параметры грани, пересекающие все три КО, в общем виде записываются так: $a:ta:c$, где $a < ta \geq c$, индексы, соответственно, $\{hkl\}$, где $h > k \geq l$.

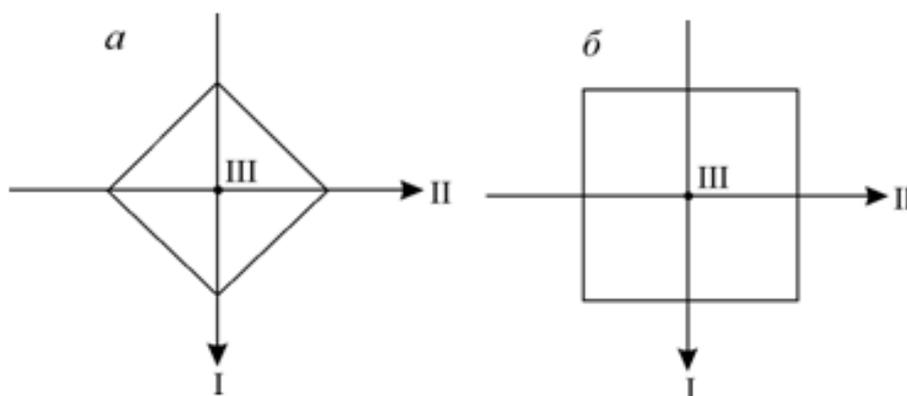
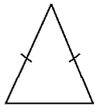
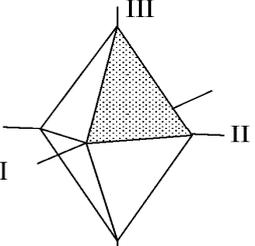
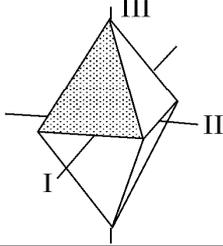
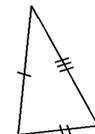
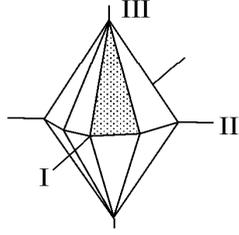
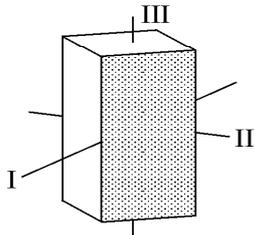
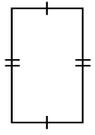
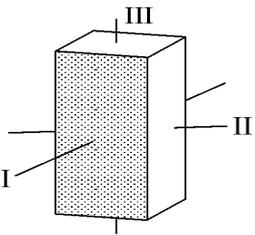


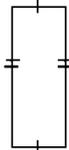
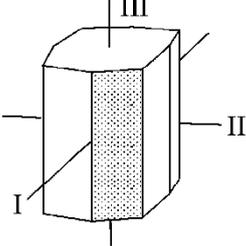
Рис. 32. Ориентировка I и II КО в формах 1-го рода (а) и 2-го рода (б)

Тетрагональные дипирамида и призма являются формами родовыми, что обусловлено установкой кристаллов в КО. Если I и II КО выведены через углы квадратного сечения, то дипирамиду и призму принято называть формой 1 рода, соответственно, через его середины – формой 2-го рода (рис. 32).

Таблица 5

Простые формы
Дитетрагонально-дипирамидальный класс – L_4L_25PC

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
8		Тетрагональная дипирамида 1 рода	$a:a:c$	$\{hhl\}$	
8		Тетрагональная дипирамида 2 рода	$a:\infty a:c$	$\{h0l\}$	
16		Дитетрагональная дипирамида	$a:ma:c$	$\{hkl\}$	
4		Тетрагональная призма 1 рода	$a:a:\infty c$	$\{110\}$	
4		Тетрагональная призма 2 рода	$a:\infty a:\infty c$	$\{100\}$	

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
8		Дитетрагональная призма	$a:ta:\infty c$	$\{hk0\}$	
2		Пинакоид	$\infty a:\infty a:c$	$\{001\}$	

6.3. Гексагональная сингония (L_6)

Кристаллы вытянутые или уплощенные вдоль L_6 , в разрезе, перпендикулярном L_6 , – шестиугольник (гексагон) или удвоенный шестиугольник (дигексагон) с углами, равными через один. Для определения параметров и индексов простой формы применяется четырехосная система КО, в которой IV КО вертикальная, другие – горизонтальные, углы между положительными направлениями горизонтальных КО равны 120° (рис. 23). Единичная грань по I, II, III КО отсекает равные отрезки, т. е. $a = b$ по КО – измеряется параметром c . Установка кристаллов в КО: вертикальная IV КО совмещается с L_6 , I, II, III КО – с любыми $3L_2$. Параметры грани, пересекающей все четыре КО, в общем виде записываются как $ta:na:\bar{a}:c$, где $a < ta < na \geq c$, индексы, соответственно, $\{\bar{k}ihl\}$ и $h > k > i \geq l$; в цифровом обозначении – $\{2131\}$.

Индекс грани по III КО легко вычислить, если принять во внимание, что он равен сумме индексов по I и II КО, взятой с обратным знаком. Рода гексагональной дипирамиды и гексагональной призмы определяются установкой кристалла в системе КО аналогично рассмотренной для тетрагональной сингонии (рис. 33).

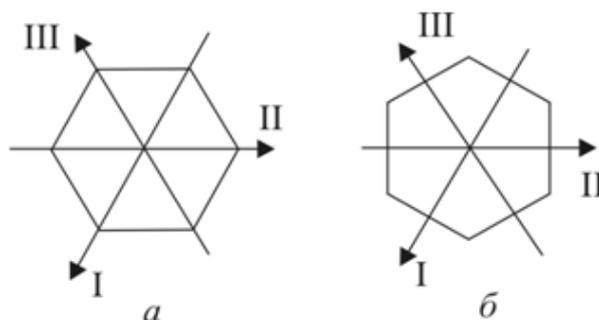
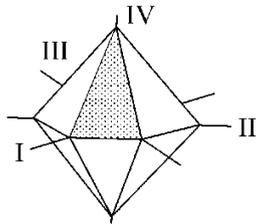
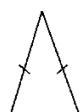
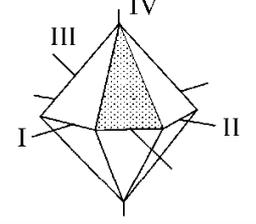
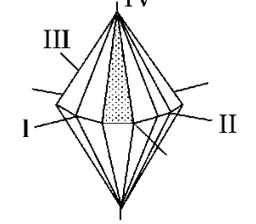
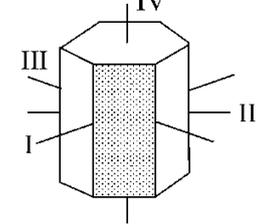
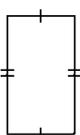
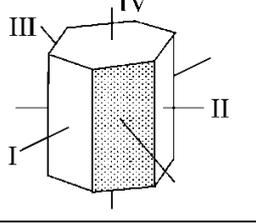
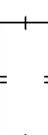
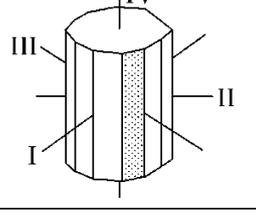


Рис. 33. Ориентировка I, II, III КО в формах 1-го рода (а) и 2-го рода (б)

Таблица 6

Простые формы
Дигексагонально-дипирамидальный класс – L_6L_27PC

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
12		Гексагональная дипирамида 1 рода	$a:\infty a:\bar{a}:c$	$\{h0\bar{h}l\}$	
12		Гексагональная дипирамида 2 рода	$2a:2a:\bar{a}:c$	$\{hh2\bar{h}l\}$	
24		Дигексагональная дипирамида	$ma:na:\bar{a}:c$	$\{ki\bar{h}l\}$	
6		Гексагональная призма 1 рода	$a:\infty a:\bar{a}:\infty c$	$\{10\bar{1}0\}$	
6		Гексагональная призма 2 рода	$2a:2a:\bar{a}:\infty c$	$\{11\bar{2}0\}$	
12		Дигексагональная призма	$ma:na:\bar{a}:\infty c$	$\{ki\bar{h}0\}$	
2		Пинакоид	$\infty a:\infty a:\infty a:c$	$\{0001\}$	

6.4. Тригональная сингония (L_3)

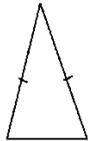
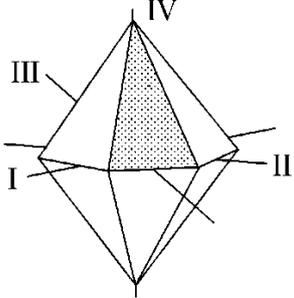
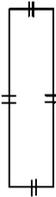
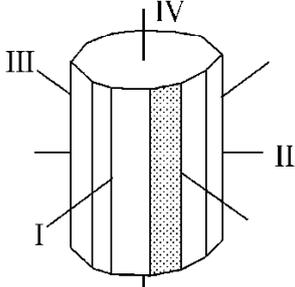
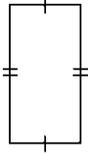
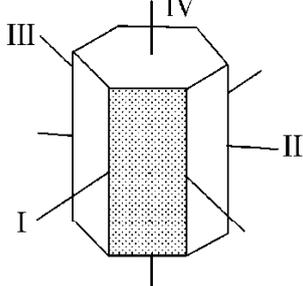
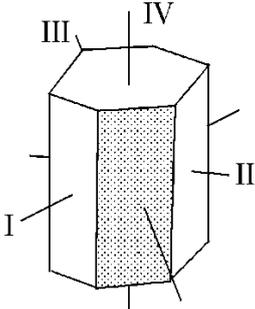
Кристаллы вытянутые или уплощенные по L_3 , в сечении, перпендикулярном L_3 , – равносторонний шестиугольник с углами, равными через один (дитригон). Как и в гексагональной сингонии, для определения параметров и индексов простой формы применяется четырехосная система КО. Установка кристаллов в КО: IV КО вертикальная и совмещается с L_3 , I, II, III КО – с $3L_2$. Обозначения параметров и индексов граней аналогичны рассмотренным для гексагональной сингонии.

Таблица 7

Простые формы

Дитригонально-скаленоэдрический класс – L_33L_23PC

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
12		Дитригональный скаленоэдр + (положительный)	$ma:na:\bar{a}:c$	$\{k\bar{i}hl\}$	
12		Дитригональный скаленоэдр – (отрицательный)	$na:ma:\bar{a}:c$	$\{i\bar{k}hl\}$	
6		Ромбоэдр + (положительный)	$a:\infty a:\bar{a}:c$	$\{h0\bar{h}l\}$	
6		Ромбоэдр – (отрицательный)	$\infty a:a:\bar{a}:c$	$\{0h\bar{h}l\}$	

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
12		Гексагональная дипирамида 2 рода	$2a:2a:\bar{a}:c$	$\{hh2\bar{h}l\}$	
12		Дигексагональная призма	$ma:na:\bar{a}:\infty c$	$\{kih0\}$	
6		Гексагональная призма 1 рода	$a:\infty a:\bar{a}:\infty c$	$\{10\bar{1}0\}$	
6		Гексагональная призма 2 рода	$2a:2a:\bar{a}:\infty c$	$\{11\bar{2}0\}$	
2		Пинакоид	$\infty a:\infty a:\infty a:c$	$\{0001\}$	

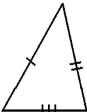
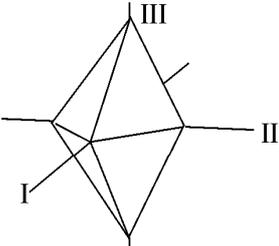
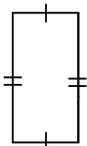
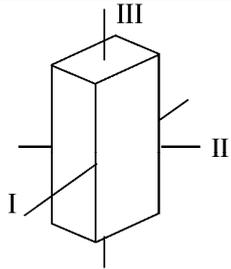
Примечание: гексагональная дипирамида, гексагональная призма и дигексагональная призма являются переходящими формами из гексагональной сингонии и присутствуют в комбинациях простых форм.

6.5. Ромбическая сингония

В поперечном сечении кристаллов – ромб; трехосная прямоугольная система КО, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, осевые отрезки единичной грани: $a \neq b \neq c$. Установка кристаллов: I, II, III КО совмещаются с $3L_2$.

Таблица 8

Простые формы
Ромбодипирамидальный класс – $3L_23PC$

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
8		Ромбическая дипирамида	$a:b:c$	$\{hkl\}$	
4		Ромбическая призма 1 рода 2 рода 3 рода	$\infty a:b:c$ $a:\infty b:c$ $a:b:\infty c$	$\{0kl\}$ $\{h0l\}$ $\{hk0\}$	
2		Пинакоид первый второй третий	$a:\infty b:\infty c$ $\infty a:b:\infty c$ $\infty a:\infty b:c$	$\{100\}$ $\{010\}$ $\{001\}$	

Оси второго порядка не эквивалентны по величине, поэтому с целью однообразия установки кристаллов во время лабораторных занятий рекомендуется III КО совмещать с наиболее длинной L_2 , I – с наиболее короткой L_2 .

Формы призм 1, 2, 3 родов, в отличие от родовых форм тетрагональной, гексагональной и тригональной сингоний, определяются параллельностью граней соответствующей КО. Например, индекс 0 в символе $\{0kl\}$ означает, что грань призмы параллельна I оси, в символе $\{h0l\}$ – параллельна II оси и т. д.

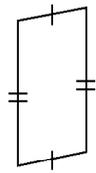
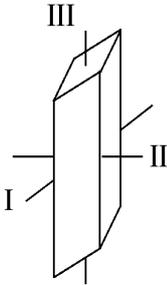
Номер пинакоида указывает на соответствующую КО, которую грань пинакоида пересекает. Например, индекс 1 в символе $\{100\}$ означает, что грань пинакоида пересекает I ось, двум другим – параллельна.

6.6. Моноклинная сингония

Наклонная система КО, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma > 90^\circ$, осевые отрезки единичной грани: $a \neq b \neq c$. Установка кристаллов: III КО – вертикальная, проводится параллельно наиболее развитому ребру кристалла, II – совмещается с L_2 , I – наклонена к наблюдателю, находится в плоскости симметрии.

Таблица 9

Простые формы
Призматический класс – L_2PC

Число граней	Облик грани	Название формы	Параметры	Индексы	Простая форма
1	2	3	4	5	6
4		Моноклинная 1 рода призма 3 рода 4 рода+ 4 рода–	$\infty a:b:c$ $a:b:\infty c$ $a:b:c$ $\bar{a}:b:c$	$\{0kl\}$ $\{hk0\}$ $\{hkl\}$ $\{hkl\}$	
2		Пинакоид 2 рода + 2 рода – Пинакоид первый второй третий	$a:\infty b:\infty c$ $\bar{a}:\infty b:\infty c$ $a:\infty b:\infty c$ $\infty a:b:\infty c$ $\infty a:\infty b:c$	$\{h0l\}$ $\{\bar{h}0l\}$ $\{100\}$ $\{010\}$ $\{001\}$	

Простые формы весьма близки к таковым ромбической сингонии, в сечении они также имеют вид ромба, потому в литературе моноклинные призмы нередко называются ромбическими призмами.

Вследствие понижения симметрии, ромбическая дипирамида $\{hkl\}$ распадается на две моноклинные призмы 4-го рода – положительную $\{hkl\}$ и отрицательную $\{\bar{h}kl\}$, пересекающие I КО соответственно в положительном или отрицательном ее направлениях.

Аналогично вместо ромбической призмы 2-го рода $\{h0l\}$ появляются два родовых пинакоида: пинакоид 2-го рода положительный $\{h0l\}$ и пинакоид 2-го рода отрицательный $\{\bar{h}0l\}$.

6.7. Триклинная сингония

В данной сингонии применяется косоугольная система КО. Все три оси пересекаются под тупыми или острыми углами $\alpha \neq \beta \neq 90^\circ$, осевые отрезки единичной грани, как в ромбической и моноклинной сингониях, не равны $a \neq b \neq c$. Кристаллографические оси проводятся параллельно трем наиболее развитым ребрам кристалла: III ось ориентируется параллельно наиболее длинному ребру, I – параллельно наиболее короткому ребру.

Пинакоидальный класс характеризуется наличием лишь центра симметрии (C), простые формы представлены пинакоидами, образующими различные комбинации, в которых выделяются родовые и номерные пинакоиды, правые и левые, положительные и отрицательные.

Параметры и индексы простых форм обозначаются, так же как в ромбической и моноклинной сингониях: $a:b:c \{hkl\}$.

Ввиду сложности установки кристаллов триклинной сингонии в системе КО разнообразие пинакоидов здесь не рассматривается.

Заканчивая обзор простых форм, приведем порядок работы с моделями кристаллов.

6.8. Порядок работы с моделями кристаллов

При выполнении лабораторных работ с моделями кристаллов принята следующая последовательность.

1. Определяем число простых форм на кристалле; на кристалле развито столько простых форм, сколько граней, различающихся по величине или очертанию.

2. Определяем элементы симметрии кристалла и записываем его класс, сингонию.

3. Производим установку кристалла в кристаллографических осях, принятых в данном классе симметрии.

4. В правом верхнем положительном октанте выбираем основную грань каждой простой формы для определения ее параметров и индексов. Если таковой грани в правом октанте нет, находим ее в левом или других октантах. Если в данном октанте находится несколько граней, принадлежащих одной простой форме, то для определения параметров и индексов выбирается грань, непосредственно пересекающая I ось или ближе к ней расположенная и наиболее удаленная от III оси; если имеется вертикальная грань, то параметры и индексы определяются для вертикальной грани, также отсекающей наименьший отрезок по I оси.

5. Вычисляем параметры и индексы простой формы, называем простую форму. Правильность определения простой формы проверяем числом граней.

Рассмотрим следующие примеры комбинаций (рис. 34).

Кристалл 1

1. Комбинация двух простых форм (1, 2).
2. $3L_44L_36L_29PC$, кубическая сингония, гексоктаэдрический класс.
3. Прямоугольная система КО; I, II, III оси совмещаются с $3L_4$.
4. Для определения параметров и индексов простых форм выбираем грани 1, 2.
5. Форма 1 – $a:\infty a:\infty a \{100\}$, гексаэдр, 6 граней; форма 2 – $a:ma:ma \{hkk\}$, тетрагонтриоктаэдр, 24 грани.

Кристалл 2

1. Комбинация трех простых форм (1, 2, 3).
2. $4L_33L_26P$, кубическая сингония, гексатетраэдрический класс.
3. Прямоугольная система КО; I, II, III оси совмещаются с $3L_2$.
4. Для определения параметров и индексов выбираем грани 1, 2, 3.
5. Форма 1 – $a:\infty a:\infty a \{100\}$, гексаэдр, 6 граней; форма 2 – $a:a:a \{111\}$ тетраэдр +, 4 грани; форма 3 – $a:\bar{a}:a \{1\bar{1}1\}$, тетраэдр –, 4 грани.

Кристалл 3

1. Комбинация четырех простых форм (1, 2, 3, 4).
2. L_44L_25PC , тетрагональная сингония, дитетрагонально-дипирамидальный класс.
3. Прямоугольная система КО; I, II оси совмещаются с $2L_2$, III – с L_4 .
4. Для определения параметров и индексов выбираем грани 1, 2, 3, 4.
5. Форма 1 – $a:\infty a:\infty c \{100\}$, тетрагональная призма 2-го рода, 4 грани; форма 2 – $a:a:\infty c, \{110\}$, тетрагональная призма 1-го рода, 4 грани; форма 3 – $a:a:c \{hhl\}$, тетрагональная дипирамида 1-го рода, 8 граней; форма 4 – $a:\infty a:c \{h0l\}$, тетрагональная дипирамида 2-го рода, 8 граней.

Кристалл 4

1. Комбинация трех простых форм (1, 2, 3).
2. $3L_23PC$, ромбическая сингония, ромбодипирамидальный класс.
3. Прямоугольная система КО; I, II, III оси совмещаются с $3L_2$.
4. Для определения параметров и индексов выбираем грани 1, 2, 3.
5. Форма 1 – $a:b:\infty c \{hk0\}$, ромбическая призма 3-го рода, 4 грани; форма 2 – $\infty a:b:c \{0kl\}$, ромбическая призма 1-го рода, 4 грани; форма 3 – $a:b:c \{hkl\}$, ромбическая дипирамида, 8 граней.

Кристалл 5

1. Комбинация трех простых форм (1, 2, 3).
2. L_2PC , моноклинная сингония, призматический класс.
3. Наклонная система КО; I – параллельная наклонному ребру, II – совмещается с L_2 , III – вертикальная, параллельная длинному ребру кристалла.
4. Определяем параметры и индексы граней 1, 2, 3.
5. Форма 1 – $a:\infty b:\infty c$ {100}, пинакоид первый, 2 грани; форма 2 – $\infty a:b:\infty c$ {010}, пинакоид второй, 2 грани; форма 3 – $\infty a:\infty b:c$ {001}, пинакоид третий, 2 грани.

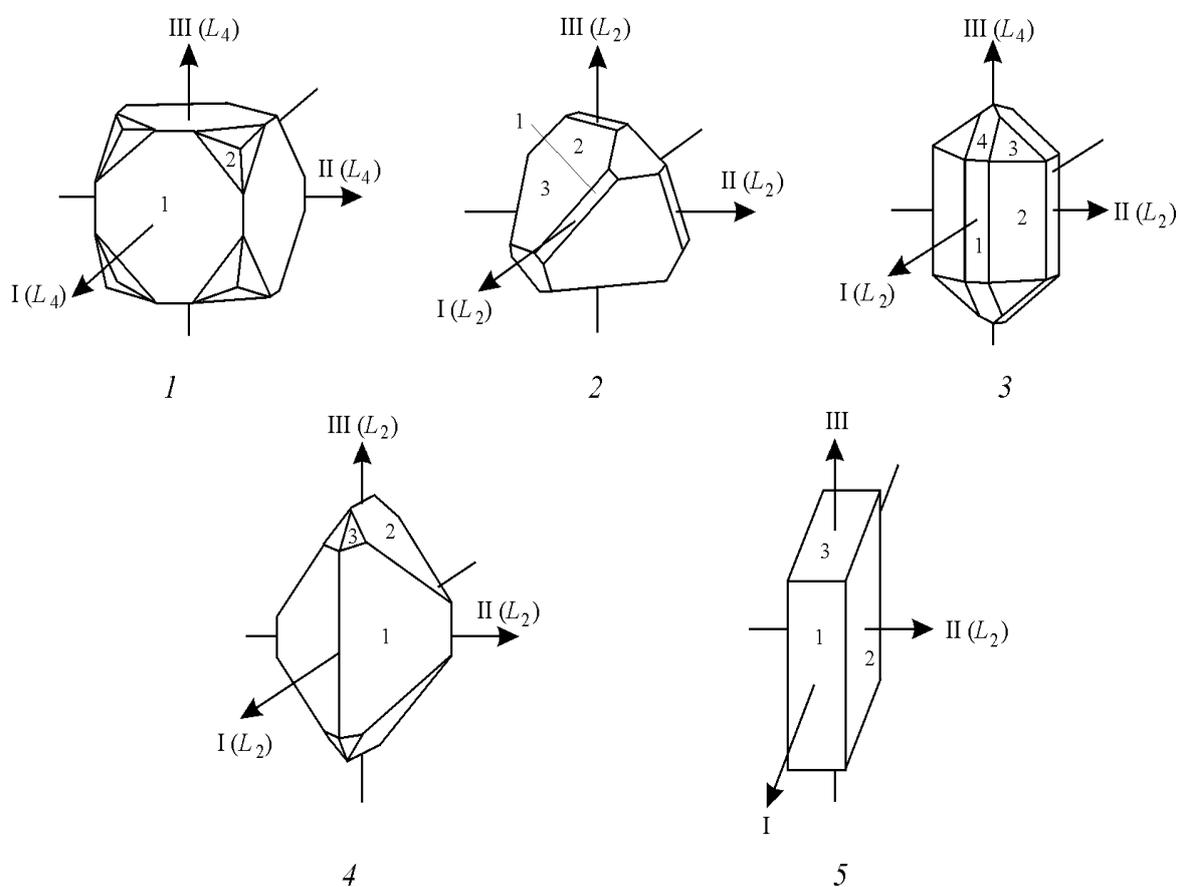


Рис. 34. Примеры комбинаций простых форм кристаллов

На рис. 35–42 в качестве примера приведены наиболее распространенные комбинации простых форм кристаллов всех сингоний.

Кубическая сингония
Гексоктаэдрический класс – $3L, 4L, 6L, 9PC$

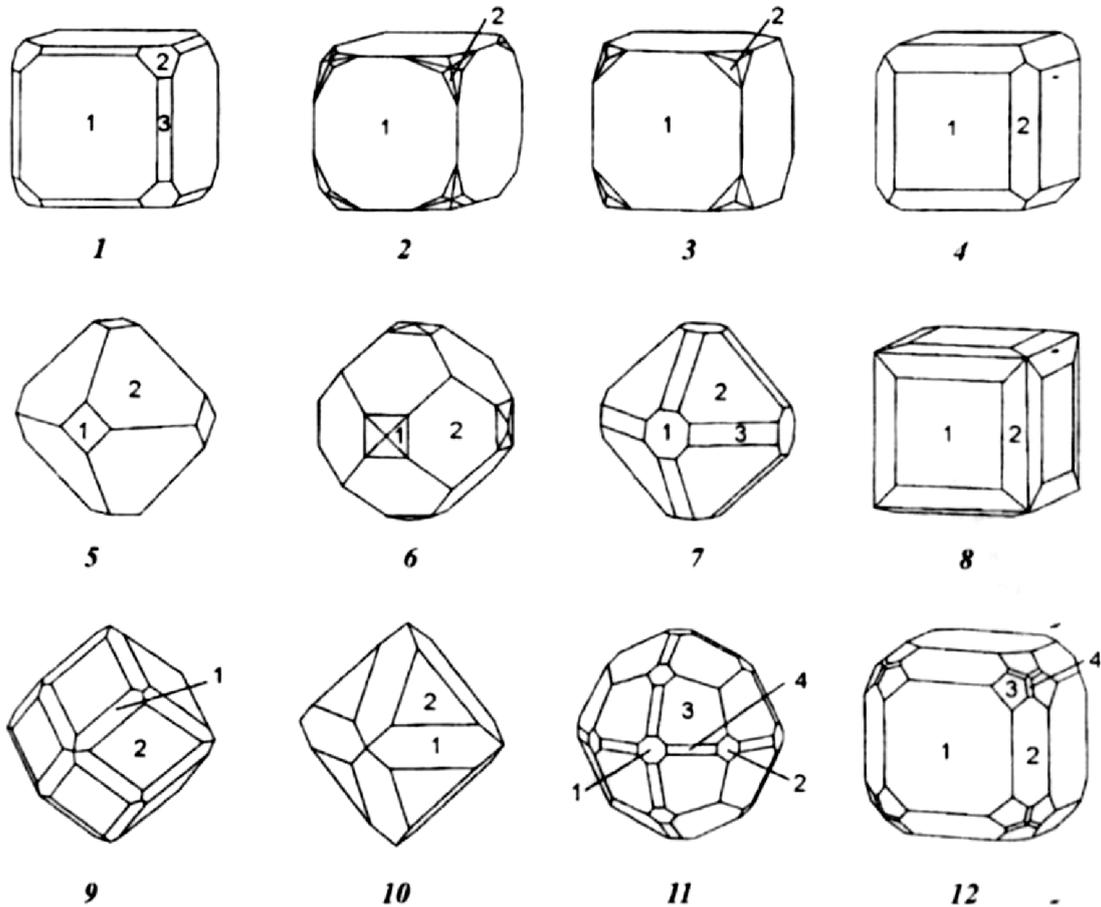


Рис. 35. Комбинации простых форм кристаллов гексоктаэдрического класса.
1 – три простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – октаэдр $\{111\}$, 3 – ромбододекаэдр $\{110\}$; **2** – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – гексоктаэдр $\{hkl\}$;
3 – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – тетрагонтриоктаэдр $\{hkk\}$;
4 – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – ромбододекаэдр $\{110\}$; **5** – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – октаэдр $\{111\}$; **6** – две простые формы: 1 – тетрагексаэдр $\{hkk\}$, 2 – ромбододекаэдр $\{110\}$; **7** – три простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – октаэдр $\{111\}$, 3 – ромбододекаэдр $\{110\}$; **8** – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – тетрагексаэдр $\{hk0\}$; **9** – две простые формы: 1 – тетрагонтриоктаэдр $\{hkk\}$, 2 – ромбододекаэдр $\{110\}$;
10 – две простые формы: 1 – ромбододекаэдр $\{110\}$, 2 – октаэдр $\{111\}$;
11 – четыре простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – ромбододекаэдр $\{110\}$, 3 – тетрагонтриоктаэдр $\{hkk\}$, 4 – тетрагексаэдр $\{hk0\}$;
12 – четыре простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – ромбододекаэдр $\{110\}$, 3 – тетрагонтриоктаэдр $\{hkk\}$, 4 – тригонтриоктаэдр $\{hhl\}$

**Кубическая сингония
Гексатетраэдрический класс – $4L_3, 3L_2, 6P$**

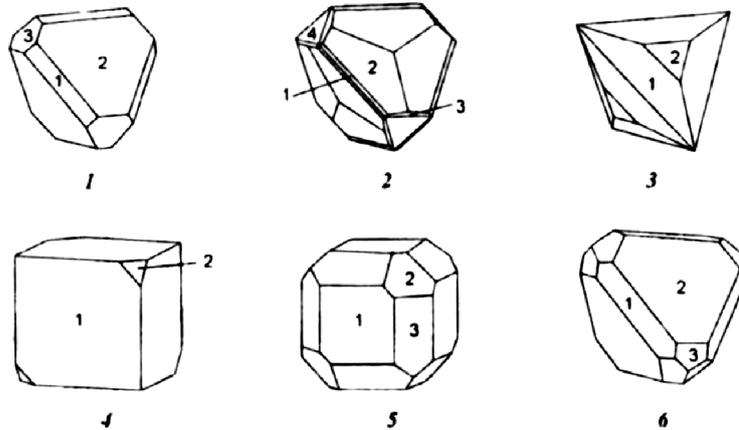


Рис. 36. Комбинации простых форм кристаллов гексатетраэдрического класса.

- 1 – три простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – тетраэдр + $\{111\}$,
 3 – тетраэдр – $\{1\bar{1}1\}$; 2 – четыре простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$,
 2 – тригонритетраэдр + $\{hkk\}$, 3 – тетрагонритетраэдр + $\{hhl\}$,
 4 – тетраэдр – $\{1\bar{1}1\}$; 3 – две простые формы: 1 – тригонритетраэдр + $\{hkk\}$,
 2 – тетраэдр + $\{111\}$; 4 – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – тетраэдр + $\{111\}$;
 5 – три простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – тетраэдр + $\{111\}$,
 3 – ромбододекаэдр $\{110\}$; 6 – три простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$,
 2 – тетраэдр + $\{111\}$, 3 – ромбододекаэдр $\{110\}$

**Кубическая сингония
Дидодекаэдрический класс – $4L_3, 3L_2, 3PC$**

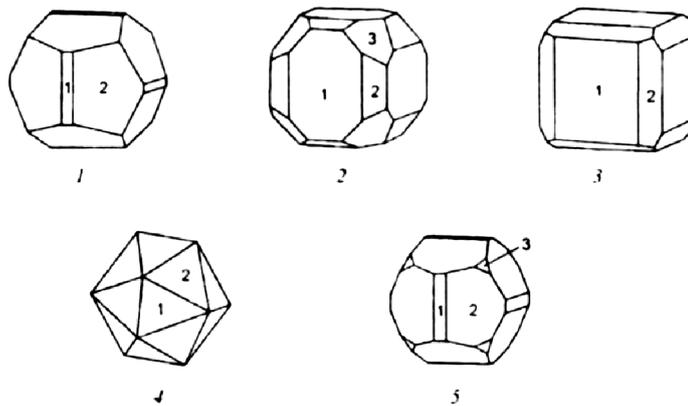


Рис. 37. Комбинации простых форм кристаллов дидодекаэдрического класса.

- 1 – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – пентагондододекаэдр + $\{hk0\}$;
 2 – три простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$, 2 – пентагондододекаэдр + $\{hk0\}$,
 3 – октаэдр $\{111\}$; 3 – две простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$,
 2 – пентагондододекаэдр + $\{hk0\}$; 4 – две простые формы: 1 – пентагондододекаэдр +
 $\{hk0\}$, 2 – октаэдр $\{111\}$; 5 – три простые формы: 1 – гексаэдр $\{100\}$,
 2 – пентагондододекаэдр + $\{hk0\}$, 3 – октаэдр $\{111\}$

Тетрагональная сингония
Дитетрагонально-дипирамидальный класс – L_44L_25PC

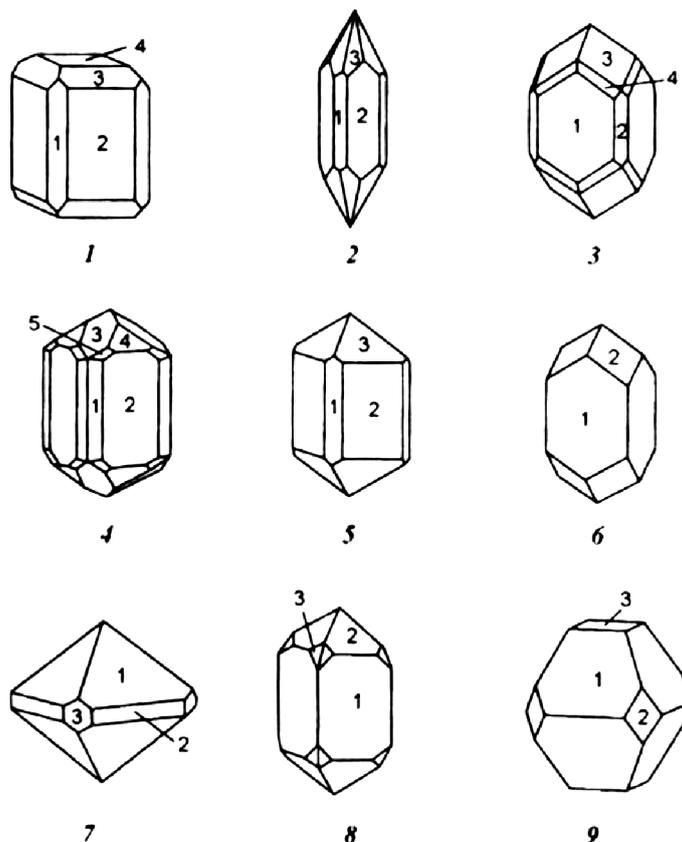


Рис. 38. Комбинации простых форм кристаллов
 дитетрагонально-дипирамидального класса.

1 – четыре простые формы: 1 – тетрагональная призма 2 рода $\{100\}$,
 2 – тетрагональная призма 1 рода $\{110\}$, 3 – тетрагональная дипирамида 1 рода
 $\{hhl\}$, 4 – пинакод $\{001\}$; 2 – три простые формы: 1 – тетрагональная призма
 2 рода $\{100\}$, 2 – тетрагональная призма 1 рода $\{110\}$, 3 – дитетрагональная
 дипирамида $\{hkl\}$; 3 – четыре простые формы: 1 – тетрагональная призма 2 рода
 $\{100\}$, 2 – тетрагональная призма 1 рода $\{110\}$, 3 – тетрагональная дипирамида
 1 рода $\{hhl\}$, 4 – дитетрагональная дипирамида $\{hkl\}$; 4 – пять простых форм:
 1 – дитетрагональная призма $\{hk0\}$, 2 – тетрагональная призма 1 рода $\{110\}$,
 3 – тетрагональная дипирамида 2 рода $\{h0l\}$, 4 – тетрагональная дипирамида
 1 рода $\{hhl\}$; 5 – три простые формы: 1 – тетрагональная призма 2 рода $\{100\}$,
 2 – тетрагональная призма 1 рода $\{110\}$, 3 – тетрагональная дипирамида 1 рода
 $\{hhl\}$; 6 – две простые формы: 1 – тетрагональная призма 2 рода $\{100\}$,
 2 – тетрагональная дипирамида 1 рода $\{hhl\}$; 7 – три простые формы:
 1 – тетрагональная дипирамида 1 рода $\{hhl\}$, 2 – тетрагональная призма 1 рода
 $\{110\}$, 3 – тетрагональная призма 2 рода $\{100\}$; 8 – три простые формы:
 1 – тетрагональная призма 1 рода $\{110\}$, 2 – тетрагональная дипирамида 1 рода
 $\{hhl\}$, 3 – дитетрагональная дипирамида $\{hkl\}$; 9 – три простые формы:
 1 – тетрагональная дипирамида 2 рода $\{h0l\}$, 2 – тетрагональная призма 1 рода
 $\{110\}$, 3 – пинакоид $\{001\}$

Гексагональная сингония
Дигексагонально-дипирамидальный класс – L_66L_27PC

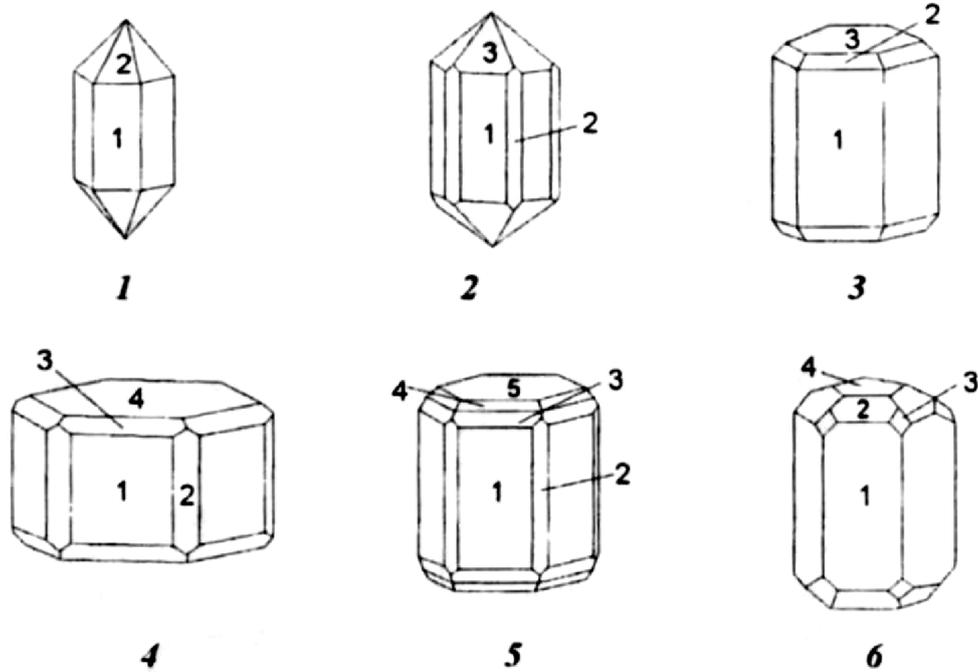


Рис. 39. Комбинации простых форм кристаллов дигексагонально-дипирамидального класса.

1 – две простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – гексагональная дипирамида 1 рода $\{h0\bar{h}l\}$; 2 – три простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – гексагональная призма 2 рода $\{11\bar{2}0\}$, 3 – гексагональная дипирамида 1 рода $\{h0\bar{h}l\}$; 3 – три простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – гексагональная дипирамида 1 рода $\{h0\bar{h}l\}$, 3 – пинакоид $\{0001\}$; 4 – четыре простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – гексагональная призма 2 рода $\{11\bar{2}0\}$, 3 – гексагональная дипирамида 1 рода $\{h0\bar{h}l\}$, 4 – пинакоид $\{0001\}$; 5 – пять простых форм: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – гексагональная призма 2 рода $\{11\bar{2}0\}$, 3, 4 – гексагональная дипирамида 1 рода $\{h0\bar{h}l\}$, 5 – пинакоид $\{0001\}$; 6 – четыре простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – гексагональная дипирамида 1 рода $\{h0\bar{h}l\}$, 3 – гексагональная дипирамида 2 рода $\{hh2\bar{h}l\}$, 4 – пинакоид $\{0001\}$

Дитригонально-скеленоэдрический класс – L_33L_23PC

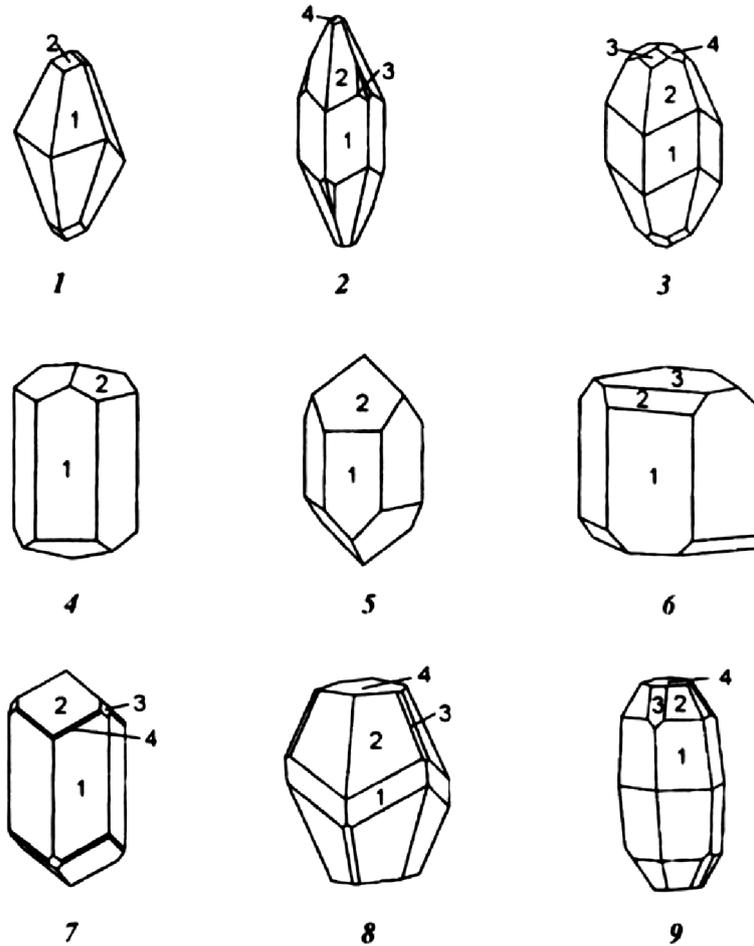
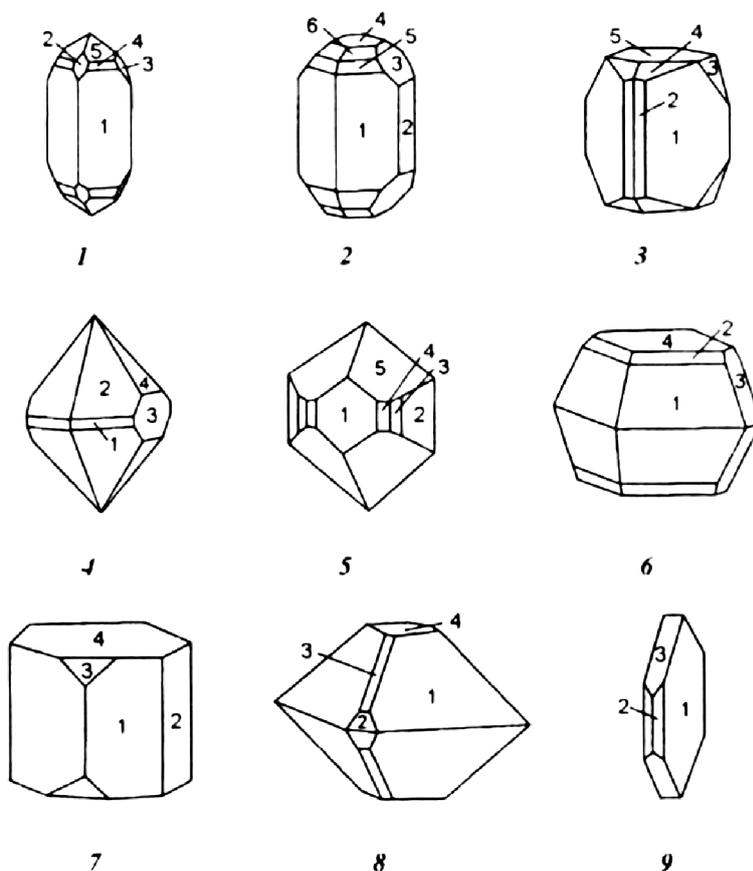


Рис. 40. Комбинации простых форм кристаллов дитригонально-скеленоэдрического класса.

1 – две простые формы: 1 – дитригональный скеленоэдр $\{ki\bar{h}l\}$, 2 – ромбоэдр + $\{h0\bar{h}l\}$; 2 – четыре простые формы: 1 – гексагональная призма 2 рода $\{11\bar{2}0\}$, 2 – дитригональный скеленоэдр + $\{ki\bar{h}l\}$, 3 – дитригональный скеленоэдр – $\{ik\bar{h}l\}$, 4 – ромбоэдр + $\{h0\bar{h}l\}$; 3 – четыре простые формы: 1 – гексагональная призма 2 рода $\{11\bar{2}0\}$, 2 – дитригональный скеленоэдр + $\{ki\bar{h}l\}$, 3 – ромбоэдр + $\{h0\bar{h}l\}$, 4 – ромбоэдр – $\{0h\bar{h}l\}$; 4 – две простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – ромбоэдр – $\{0h\bar{h}l\}$; 5 – две простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – ромбоэдр + $\{h0\bar{h}l\}$; 6 – три простые формы: 1 – гексагональная призма 1 рода $\{10\bar{1}0\}$, 2 – ромбоэдр + $\{h0\bar{h}l\}$, 3 – пинакоид $\{0001\}$; 7 – четыре простые формы: 1 – гексагональная призма 2 рода $\{11\bar{2}0\}$, 2 – ромбоэдр + $\{h0\bar{h}l\}$, 3 – ромбоэдр – $\{0h\bar{h}l\}$, 4 – дитригональный скеленоэдр + $\{ki\bar{h}l\}$; 8 – четыре простые формы: 1 – гексагональная призма 2 рода $\{11\bar{2}0\}$, 2 – дитригональный скеленоэдр + $\{ki\bar{h}l\}$, 3 – ромбоэдр – $\{0h\bar{h}l\}$, 4 – пинакоид $\{0001\}$; 9 – четыре простые формы: 1, 2 – гексагональная дипирамида 2 рода $\{hh2\bar{h}l\}$, 3 – ромбоэдр + $\{h0\bar{h}l\}$, 4 – пинакоид $\{0001\}$

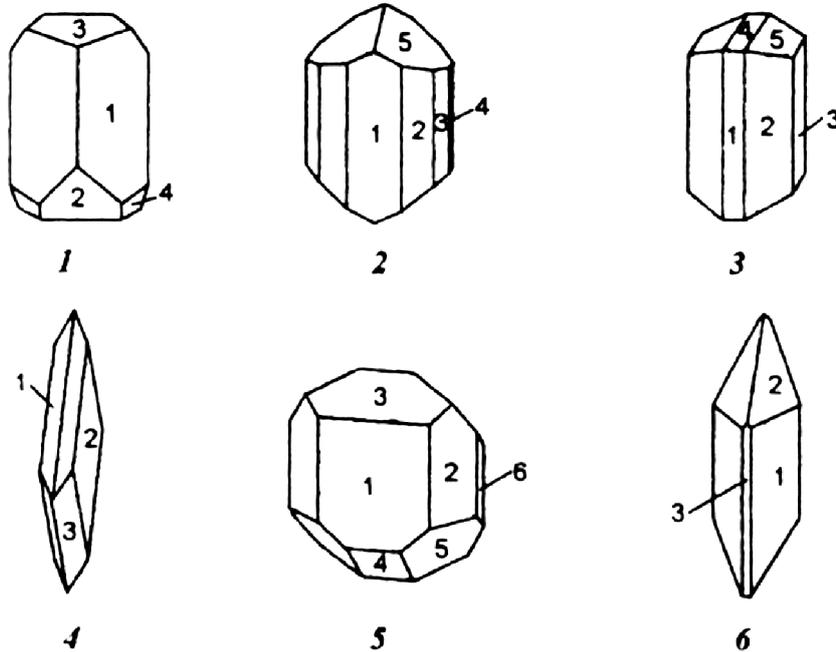
Ромбическая сингония
Ромбодипирамидальный класс – $3L_23PC$



*Рис. 41. Комбинации простых форм кристаллов
ромбодипирамидального класса:*

1 – пять простых форм: 1 – ромбическая призма 3 рода $\{hk0\}$, 2 – ромбическая призма 2 рода $\{h0l\}$, 3 – ромбическая призма 1 рода $\{0kl\}$, 4, 5 – ромбическая дипирамида $\{hkl\}$; 2 – шесть простых форм: 1 – ромбическая призма 3 рода $\{hk0\}$, 2 – пинакоид второй $\{010\}$, 3 – ромбическая призма 1 рода $\{0kl\}$, 4 – пинакоид третий $\{001\}$, 5, 6 – ромбическая дипирамида $\{hkl\}$; 3 – пять простых форм: 1, 2 – ромбическая призма 3 рода $\{hk0\}$, 3 – ромбическая призма 1 рода $\{0kl\}$, 4 – ромбическая дипирамида $\{hkl\}$, 5 – пинакоид третий $\{001\}$; 4 – четыре простые формы: 1 – ромбическая призма 3 рода $\{hk0\}$, 2 – ромбическая дипирамида $\{hkl\}$, 3 – пинакоид второй $\{010\}$, 4 – ромбическая призма 1 рода $\{0kl\}$; 5 – пять простых форм: 1 – пинакоид первый $\{100\}$, 2, 3, 4 – ромбическая призма 3 рода $\{hk0\}$, 5 – ромбическая дипирамида $\{hkl\}$; 6 – четыре простые формы: 1, 2 – ромбическая дипирамида $\{hkl\}$, 3 – ромбическая призма 1 рода $\{0kl\}$, 4 – пинакоид третий $\{001\}$; 7 – четыре простые формы: 1 – ромбическая призма 3 рода $\{hk0\}$, 2 – пинакоид второй $\{010\}$, 3 – ромбическая призма 2 рода $\{h0l\}$, 4 – пинакоид третий $\{001\}$; 8 – четыре простые формы: 1 – ромбическая дипирамида $\{hkl\}$, 2, 3 – ромбическая призма 2 рода $\{h0l\}$, 4 – пинакоид третий $\{001\}$; 9 – три простые формы: 1 – пинакоид второй $\{010\}$, 2 – ромбическая призма 3 рода $\{hk0\}$, 3 – ромбическая призма 2 рода $\{h0l\}$

**Моноклиная сингония
Призматический класс – L_2PC**



**Триклиная сингония
Пинакоидальный класс - C**

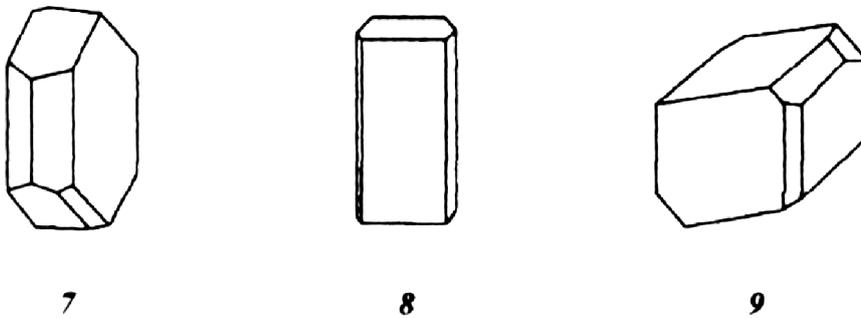


Рис. 42. Комбинации простых форм кристаллов.

- 1 – четыре простые формы: две моноклинные призмы (1, 4), два пинакоида (2, 3);
 2 – пять простых форм: три моноклинные призмы (2, 3, 5), два пинакоида (1, 4);
 3 – пять простых форм: две моноклинные призмы (2, 5), три пинакоида (1, 3, 4);
 4 – три простые формы: две моноклинные призмы (1, 3), пинакоид (2);
 5 – шесть простых форм: четыре пинакоида (1, 3, 4, 6), две моноклинные призмы (2, 5);
 6 – три простые формы: две моноклинные призмы (1, 2), пинакоид (3);
 7 – комбинация шести пинакоидов; 8 – четыре пинакоида; 9 – шесть пинакоидов*

7. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РОСТ КРИСТАЛЛОВ

В природе и лабораторных условиях кристаллы образуются из твердых, газообразных и жидких веществ.

Примером образования кристаллов из твердого состояния служит переход аморфного вещества в кристаллическое. Искусственное стекло со временем становится мутным, рассеивающим свет вследствие образования в нем мельчайших кристалликов. Вулканическое стекло, получающееся при быстром застывании излившейся на поверхность земли огненно жидкой лавы, в течение тысячелетий также превращается в агрегат кристаллов различных минералов.

Образование кристаллов из газообразного (парообразного) состояния широко распространено как в природе, так и в лабораторной и заводской практике. В природных условиях при извержении вулканов из газообразной фазы на стенках кратеров, например, выделяются кристаллы серы. Из газообразного состояния образуются кристаллики снега. На заводах и в лабораториях кристаллический магний, карборунд и другие получают из газообразного состояния вещества.

Однако наибольший интерес представляет образование кристаллов из жидкого вещества. Переход из жидкого состояния в кристаллическое возможен из расплава и раствора. Примером кристаллизации расплава служит магма; магматические горные породы, слагающие земную кору, состоят из кристаллов различных минералов.

Раствором твердого тела в жидкости, как известно из химии, называется однородная жидкая смесь твердого тела с жидкостью. Растворы бывают ненасыщенные, насыщенные и пересыщенные. Ненасыщенный раствор – тот, в котором данное вещество при данных условиях способно еще растворяться. Насыщенный раствор – раствор, в котором новые порции растворенного вещества уже не растворяются при данных условиях в данном объеме растворителя. Перенасыщенным называется раствор, содержащий избыток растворенного вещества сравнительно с насыщенным. Перенасыщенный раствор нельзя получить простым прибавлением к насыщенному раствору новой порции твердого вещества. Они могут быть получены при понижении температуры насыщенного раствора, при испарении насыщенных растворов, при некоторых химических реакциях.

Образование кристаллов возможно в перенасыщенных растворах. В природе распространено образование кристаллических осадков различных солей из перенасыщенных растворов, например, в водных бассейнах Прикаспийской области (залив Кара-Богаз-Гол, озера Эльтон, Баскунчак и др.).

7.1. Возникновение кристаллов

В качестве простейшего примера рассмотрим возникновение кристаллов из перенасыщенного раствора галита (поваренная соль) $NaCl$.

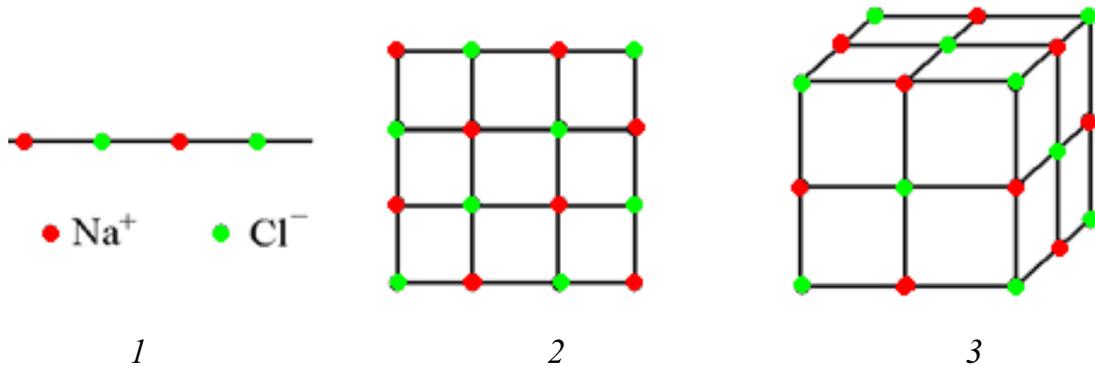


Рис. 43. Образование кристаллического зародыша $NaCl$:
1 – одномерный кристалл; 2 – двумерный кристалл;
3 – кристаллическая решетка (кристаллический зародыш)

В растворе имеются положительно заряженные ионы Na^+ и отрицательные – ионы Cl^- . С понижением температуры раствора уменьшается энергия движений этих ионов, и разноименно заряженные ионы, притягиваясь друг к другу, образуют цепочку одномерных кристаллов; последние, сближаясь, образуют двумерный кристалл, который, в свою очередь, соединяясь с другими, формирует кристаллические решетки – мельчайшие кристаллики, называемые кристаллическими зародышами, или центрами кристаллизации (рис. 43).

7.2. Рост кристаллов

Рост кристаллов заключается в разрастании уже имеющейся кристаллической решетки (зародыша) путем присоединения к ней новых частиц и отложений слоев, параллельных плоским сеткам пространственной решетки. В соответствии с теорией роста кристаллов, а также непосредственными наблюдениями над ростом кристалла доказано, что *рост кристалла происходит за счет новых слоев вещества, откладывающихся так, что грани передвигаются параллельно самим себе.*

Скоростью нарастания грани называется величина нормального к ее плоскости отрезка, на который данная грань передвигается в единицу времени (рис. 44).

Скорость нарастания различных граней кристалла различна. Грани с большой скоростью нарастания постепенно уменьшаются в размерах, вытесняются разрастающимися гранями с малой скоростью нарастания

и могут совсем исчезнуть с поверхности кристалла (рис. 45). Следовательно, кристалл покрывается гранями, имеющими малую скорость нарастания. Скорость нарастания граней зависит от многих факторов: внутренних и внешних. Из внутренних факторов наибольшее влияние на скорость нарастания граней оказывает их *ретикулярная плотность*, что выражается законом Бравэ: *кристалл покрывается гранями с большей ретикулярной плотностью*. Таким образом, *свободно растущий кристалл покрывается гранями с наименьшей скоростью роста и наибольшей ретикулярной плотностью*.

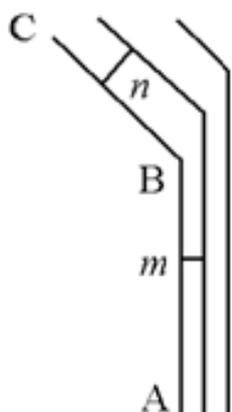


Рис. 44. Передвижение граней при росте кристалла:
 m – скорость нарастания грани АВ,
 n – грани ВС

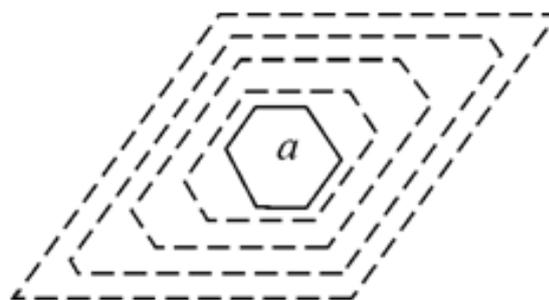


Рис. 45. Грани с большей скоростью нарастания (a) уменьшаются в процессе роста и исчезают с поверхности кристалла

Наибольший интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения представляет формирование новых слоев на кристаллическом теле в процессе роста. Теория Косселя–Странского рассматривает рост идеального кристалла. Каждый слой вещества на растущем кристалле образуется за счет присоединения к нему новых частиц вещества. Присоединяться такие частицы к растущему слою могут в точках a и b (рис. 46) или на поверхность слоя (точка c). В каждом случае присоединение частиц сопровождается выделением разного количества энергии: минимальная энергия – в точке c , максимальная – в точке a . Каждая материальная частица стремится в трехгранный входящий угол (точка a), где может освободить максимальную энергию, затем в точку b и с наименьшей вероятностью – в точку c . Следовательно, пока не завершится построение растущего слоя, в котором всегда есть благоприятное место для присоединения новых частиц, отложение очередного слоя на кристалле не начнется.

Детальные изучения граней реальных кристаллов показывают многочисленные их отклонения от идеальных форм, в частности, от плоскогранности. Различные усложнения на поверхности граней (см. гл. 9) указывают на более сложный механизм роста кристаллов, чем предложен теорией Косселя–Странского. В 1945 г. советский кристаллограф Г.Г. Леммлейн заметил тончайшие спирали на поверхности кристалла карборунда, а затем и на кристаллах многих других минералов (рис. 47). В результате была разработана теория несовершенного роста кристаллов – теория дислокаций (В. Бартон, Н. Кабрера, Ф. Франк), согласно которой кристаллическая решетка в процессе роста приобретает различные дефекты, в частности незначительные смещения решетки (рис. 48). Такие смещения образуют на поверхности растущей грани своего рода «ступеньку», во внутренние углы которой стремятся новые частицы вещества растущего кристалла. В итоге рост грани происходит не слой за слоем, а непрерывной спиралью, закручивающей слой, уменьшающийся к центру грани (рис. 47). Направление закручивания слоя называется *осью винтовой дислокации*.

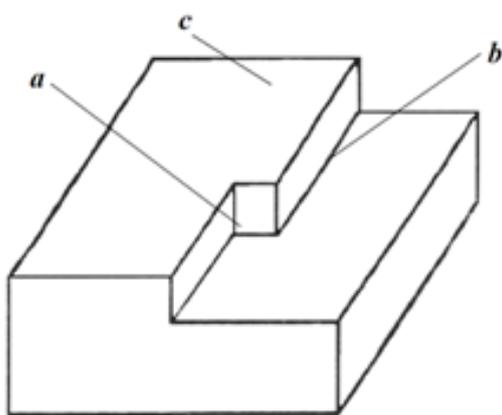


Рис. 46. Возможные варианты (a, b, c) присоединения частиц к растущему кристаллу



Рис. 47. Спираль роста на грани карборунда (SiC)

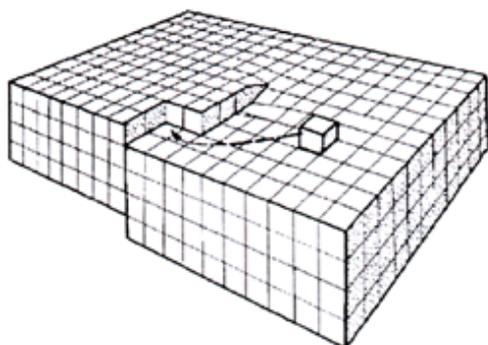


Рис. 48. Дефект кристаллической решетки создает «ступеньку», максимально выгодную для присоединения частиц к растущему кристаллу

Таким образом, обе теории – совершенного и несовершенного роста кристаллов – выступают не взаимоисключающими, а дополняют друг друга и дают понятие о сложном, многофакторном процессе роста кристаллов.

7.3. Факторы, влияющие на форму кристаллов

На форму кристаллов в процессе их роста влияют многие разнообразные факторы: концентрационные потоки, концентрация и температура раствора, примеси постороннего вещества и другие.

7.3.1. Концентрационные потоки

Рост кристалла вызывает нарушение однородности раствора, которое заключается в следующем. Поступление избытка вещества к растущему кристаллу обуславливает появление вокруг кристалла зоны менее насыщенного раствора, которая называется *двориком кристаллизации*. Раствор внутри дворика кристаллизации характеризуется также более высокой температурой, так как рост кристалла сопровождается выделением энергии в виде тепла. Уменьшение концентрации раствора, повышение температуры уменьшают удельный вес раствора внутри дворика кристаллизации, в результате чего жидкость меньшего удельного веса поднимается от кристалла в виде восходящих струек, которые называются *концентрационными потоками*. На место поднявшегося ненасыщенного раствора с боков и снизу поступает перенасыщенный раствор, обеспечивающий дальнейший рост кристалла (рис. 49, 1).

При растворении кристалла также образуются концентрационные потоки, но они направлены сверху вниз (нисходящие) (рис. 49, 2).

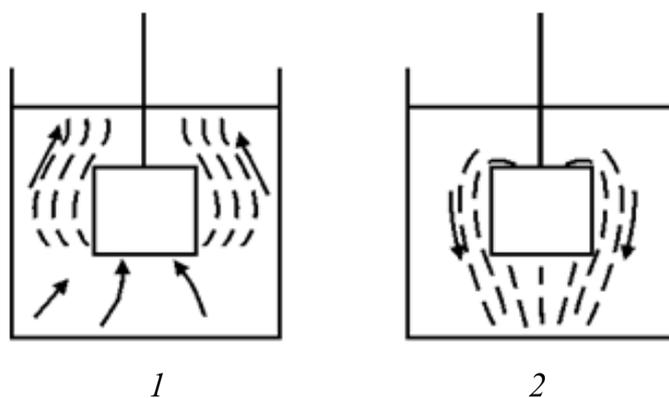


Рис. 49. Концентрационные потоки:
1 – восходящие при росте кристалла;
2 – нисходящие при растворении кристалла

Концентрационные потоки на внешнюю форму кристалла оказывают весьма существенное влияние: на подвешенном кристалле в растворе наиболее быстрый рост граней наблюдается снизу, менее интен-

сивный – сбоку и самый медленный – сверху. Таким образом, вырастают кристаллы, развитые лишь в определенных направлениях. В лабораторных и заводских условиях используется ряд методов, ослабляющих влияние концентрационных потоков на форму кристаллов.

7.3.2. Концентрация и температура раствора

Степень перенасыщения раствора играет существенную роль в изменении формы кристалла одного и того же вещества. Экспериментально уже давно показано, что при малых и больших перенасыщениях раствора образуются кристаллы, представленные либо одной простой формой, либо простыми комбинациями; при средней степени перенасыщения растут кристаллы со сложными комбинациями простых форм. В качестве примера приводятся кристаллы квасцов, полученные опытным путем известным кристаллографом А.В. Шубниковым при различных концентрациях раствора (рис. 50).

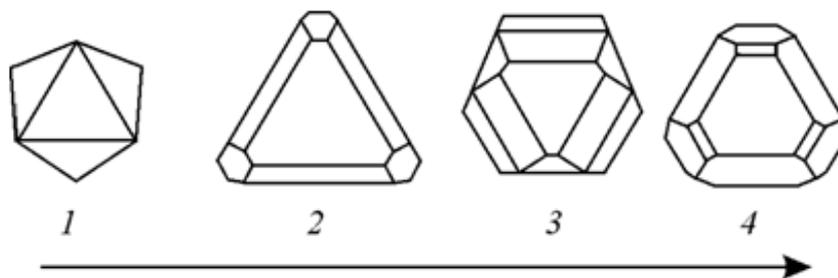


Рис. 50. Влияние концентрации раствора на форму кристаллов квасцов: 1 – кристалл в форме октаэдра; 2, 3 – комбинация нескольких простых форм; 4 – кристалл с преимущественным развитием грани октаэдра, форма приближается к шаровой

Примером изменения формы кристаллов с изменением температуры служат кристаллы эпсомита ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). По мере повышения температуры раствора, при постоянной его концентрации, кристалл утолщается (рис. 51).

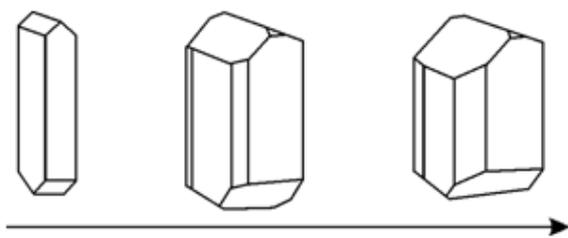


Рис. 51. Изменение формы кристаллов эпсомита с повышением температуры раствора

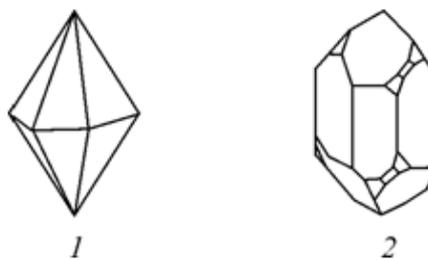


Рис. 52. Кристаллы кварца высокотемпературного (1) и низкотемпературного (2)

происхождения

В природных условиях кристаллы кварца (SiO_2) при температуре $> 573^\circ\text{C}$ растут в форме гексагональной дипирамиды, при более низкой температуре ($< 573^\circ\text{C}$) – форма кристаллов призматическая (см. рис. 52).

7.3.3. Примеси в растворе

Изменение формы кристаллов вызывают различные примеси посторонних веществ в растворе. Классический пример представляет превращение октаэдрических кристаллов квасцов в кубические при добавлении в раствор буры (рис. 53).

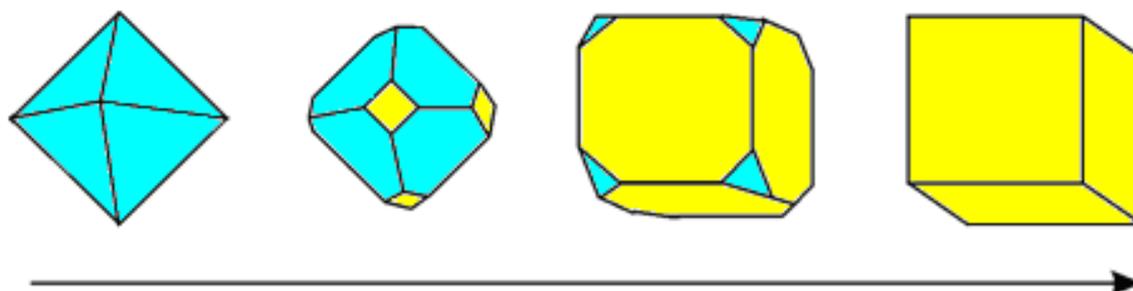


Рис. 53. Октаэдр квасцов превращается в куб при росте в растворе с примесью буры

Природные кристаллы пирита (FeS_2) обычно кубической формы, однако на кристаллах, содержащих примесь кобальта, вершины куба притупляются гранями октаэдра или кристалл становится октаэдрическим.

Таким образом, на внешнюю форму (облик, габитус) кристалла в процессе его роста в лабораториях и природных условиях влияют различные факторы, и рассмотренные здесь примеры далеко не исчерпывают всех причин вариаций форм кристаллов.

8. ЗАКОН ПОСТОЯНСТВА ГРАННЫХ УГЛОВ

Среди кристаллов принято различать *идеальные* и *искаженные (реальные)*. Идеально развитым считается кристалл, если расстояния (по перпендикуляру) от его центра до различных граней одинаковы. Если данные расстояния отличаются друг от друга, то кристалл относится к искаженным. Искаженными также считаются кристаллы с неполным развитием и не одинаковой величиной граней одной и той же простой формы. В природе идеальные кристаллы встречаются сравнительно редко, обычно они в той или иной мере искажены. При этом различные кристаллы одного и того же вещества с одинаковым строением пространственной решетки могут различаться величиной и формой граней. Однако в различных кристаллах одного и того же вещества, несмотря на разнообразие внешних форм, углы между соответственными гранями остаются постоянными.

На рис. 54 изображены некоторые из встречающихся форм кристаллов кварца, на которых углы, например, между гранями a и b , b и c одинаковые.

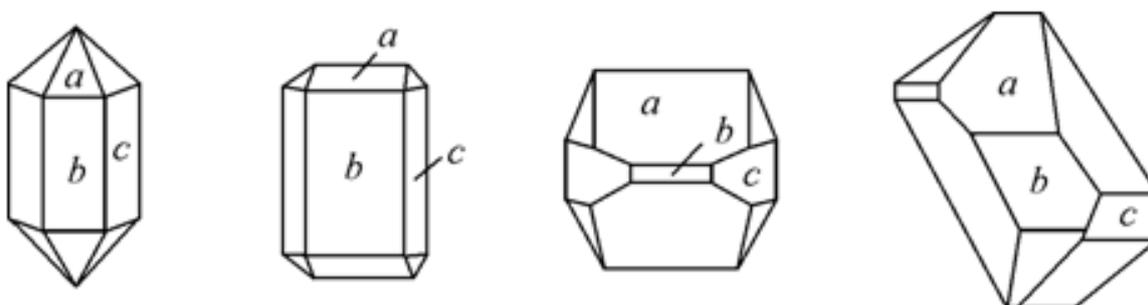


Рис. 54. Разнообразие форм кристаллов кварца при постоянстве углов между соответственными гранями (a , b , c)

Постоянство граничных углов – один из основных законов кристаллографии, формулируется следующим образом: *во всех кристаллах одного и того же вещества углы между соответственными гранями (и ребрами) постоянны.*

Открытие закона принадлежит датскому ученому Н. Стено (1669), спустя почти столетие постоянство граничных углов было подтверждено М.В. Ломоносовым и французским кристаллографом Ромэ-Делилем. В связи с этим в кристаллографии закон известен также под названием закона Стено–Ломоносова–Ромэ-Делиля.

Закон постоянства граничных углов является следствием решетчатого строения кристаллов: параметры пространственной решетки во всех

кристаллах одного и того же вещества одинаковы, поэтому и углы между гранями, отвечающими одним и тем же плоским сеткам в различных кристаллах, должны быть постоянными.

В соответствии с законом постоянства граничных углов кристаллы определенного вещества характеризуются своими определенными углами. Следовательно, измерением углов можно доказать принадлежность состава исследуемого кристалла тому или иному веществу.

Измерение углов между гранями кристалла производится специальным прибором, который носит название *гониометр*. Гониометры существуют двух типов: прикладной и отражательный. Наиболее прост в употреблении прикладной гониометр (рис. 55).

Исследуемый кристалл (*K*) зажимается между двумя металлическими линейками *AB* и *CD*, отсчеты берутся по транспортиру, присоединенному к *CD*. Прикладной гониометр обеспечивает сравнительно малую точность измерения углов. Большая точность измерений достигается применением оптического двухкружного гониометра (рис. 56), изобретенного гениальным русским кристаллографом Е.С. Федоровым (1853–1919).

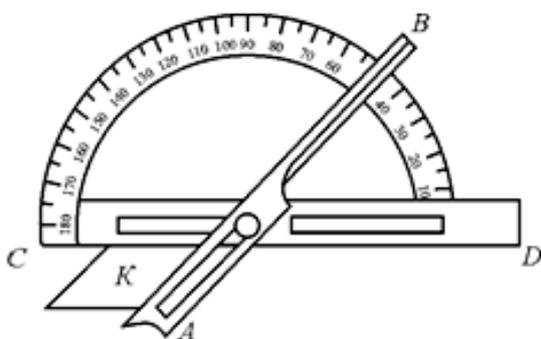


Рис. 55. Прикладной гониометр

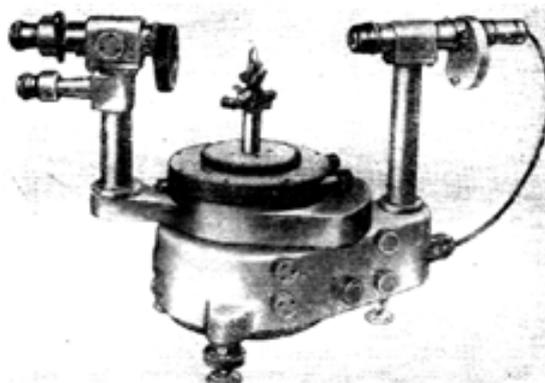


Рис. 56. Отражательный гониометр

9. ФОРМЫ РЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Идеально развитые кристаллы, как уже отмечалось, в природе встречаются сравнительно редко. Встречающиеся кристаллы имеют отклонения от идеальных форм, которые выражаются в следующем.

1. Симметрия реального кристалла вследствие неодинакового развития граней одной и той же простой формы создает ошибочное впечатление заниженной. Примером могут служить кубические кристаллы, которые нередко имеют форму вытянутого параллелепипеда.

2. Реальные грани кристаллов далеки от математических плоскостей. На них почти всегда обнаруживаются различные усложнения в виде бугорков, ямок, вициналей, штриховки. Наличие подобных усложнений принято называть *скульптурой грани*.

Под *вициналями* понимаются участки грани, незначительно уклоненные от плоскости самой грани. Чаще всего вицинали проявляются в виде плоских пирамидок и узких полосок, составляющих друг с другом малые углы. Например, вицинали в виде пирамидок часто наблюдаются на гранях кристаллов кварца. Своеобразные вициальные скопления пирамидок и полосок обычны на кристаллах везувиана $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})_4$, придающие его граням сложную скульптуру (рис. 57).

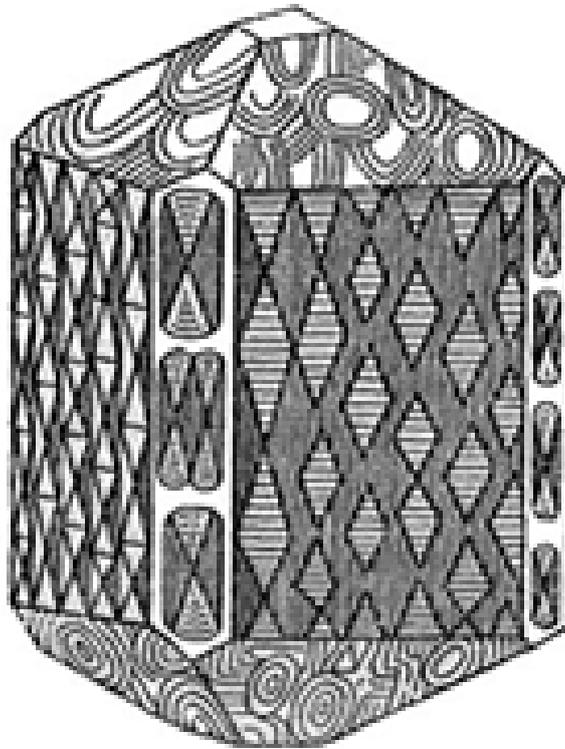


Рис. 57. Кристалл везувиана со сложной скульптурой граней

Наличие штриховки на гранях кристаллов также отражает особенность его роста, и для некоторых кристаллов она является весьма характерной. Например, поперечная штриховка на гранях призмы кварца, в трех пересекающихся направлениях – на гранях октаэдра магнетита Fe_3O_4 , в трех взаимно перпендикулярных направлениях – на гранях гексаэдра пирита FeS_2 (рис. 58).

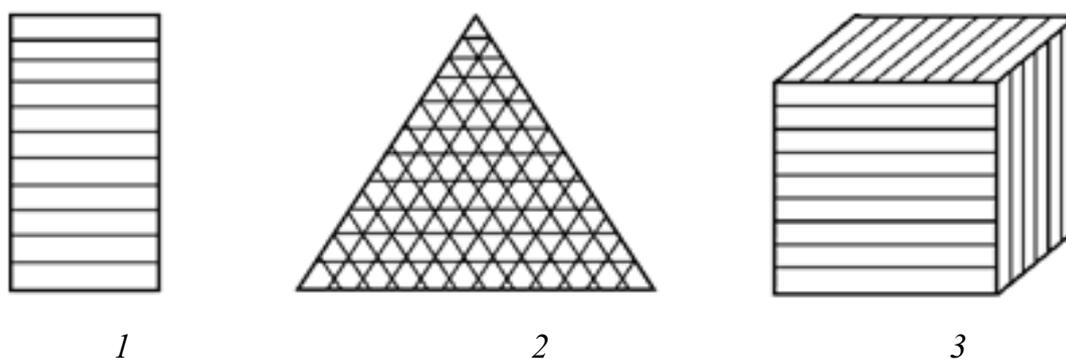


Рис. 58. Штриховка на гранях кварца (1), магнетита (2), пирита (3)

3. При сильных отклонениях от условий нормальной кристаллизации, например в вязких средах или в условиях быстро понижающейся температуры, возникают усложненные формы кристаллов – *скелеты* и *антискелеты*.

Кристаллы-скелеты возникают в том случае, если происходит ускоренный рост его ребер и вершин, а грани отстают в своем росте. Поэтому на скелетных кристаллах наблюдаются входящие углы и воронки, выступающие ветки, ступеньки (рис. 59, 60). Классическим примером кристаллических скелетов являются снежинки, которые состоят из форм, образованных нарастанием вершин и ребер (рис. 59).



Рис. 59. Скелетная форма кристалла снежинки

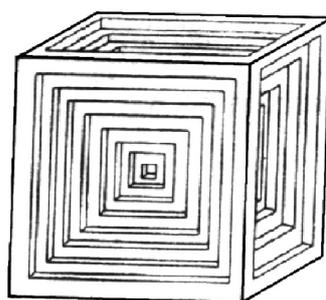


Рис. 60. Скелетный кристалл галита



Рис. 61. Антискелетный кристалл алмаза

Кристаллы-антискелеты (выпуклые) образуются, когда наибольшая скорость роста грани происходит от ее середины, меньшей скоростью роста характеризуются вершины и ребра. Примером кристаллических

антискелетов являются округлые или близкие к ним формы кристаллов алмаза (рис. 61).

9.1. Сrostки кристаллов

В природных условиях чаще образуются не отдельные кристаллы, а кристаллические сrostки. Среди сrostков по особенностям ориентировки кристаллов в пространстве различают незакономерные и закономерные. К незакономерным сrostкам относятся сrostки нескольких кристаллов без взаимной ориентировки в пространстве. Подобные сrostки называются *друзами* (рис. 62). В форме друз встречаются кристаллы кварца, кальцита, граната и другие.

Наибольший интерес представляют закономерные сrostки кристаллов, среди которых различают параллельные сrostки и двойники. Параллельные сrostки представляют собой несколько однородных кристаллов, сросшихся в параллельной относительно друг друга ориентировке (рис. 63). В таких срастаниях структура каждого отдельного кристалла является непосредственным продолжением структуры соседних кристаллов.



Рис. 62. Друза кристаллов аметиста



Рис. 63. Параллельный сrostок кристаллов серы

Более сложные образования представляют двойниковые сrostки.

9.2. Двойники

Среди двойников различают двойники срастания, двойники прорастания и полисинтетические (сложные) двойники.

Двойником называется закономерный сrostок двух однородных кристаллов, в котором один кристалл является зеркальным отражением другого или же один кристалл повернут относительно другого на 180° (рис. 64).

В двойниках различают следующие элементы: двойниковая плоскость, двойниковая ось, плоскость срастания (рис. 65).

Двойниковая плоскость – такая плоскость, при отражении в которой из одного кристалла двойника выводится другой. Иначе говоря, двойниковая плоскость является новой плоскостью симметрии двойника.

Двойниковая ось – направление, при повороте вокруг которого на 180° из одного кристалла двойника выводится другой. Двойниковая ось обычно перпендикулярна к двойниковой плоскости.

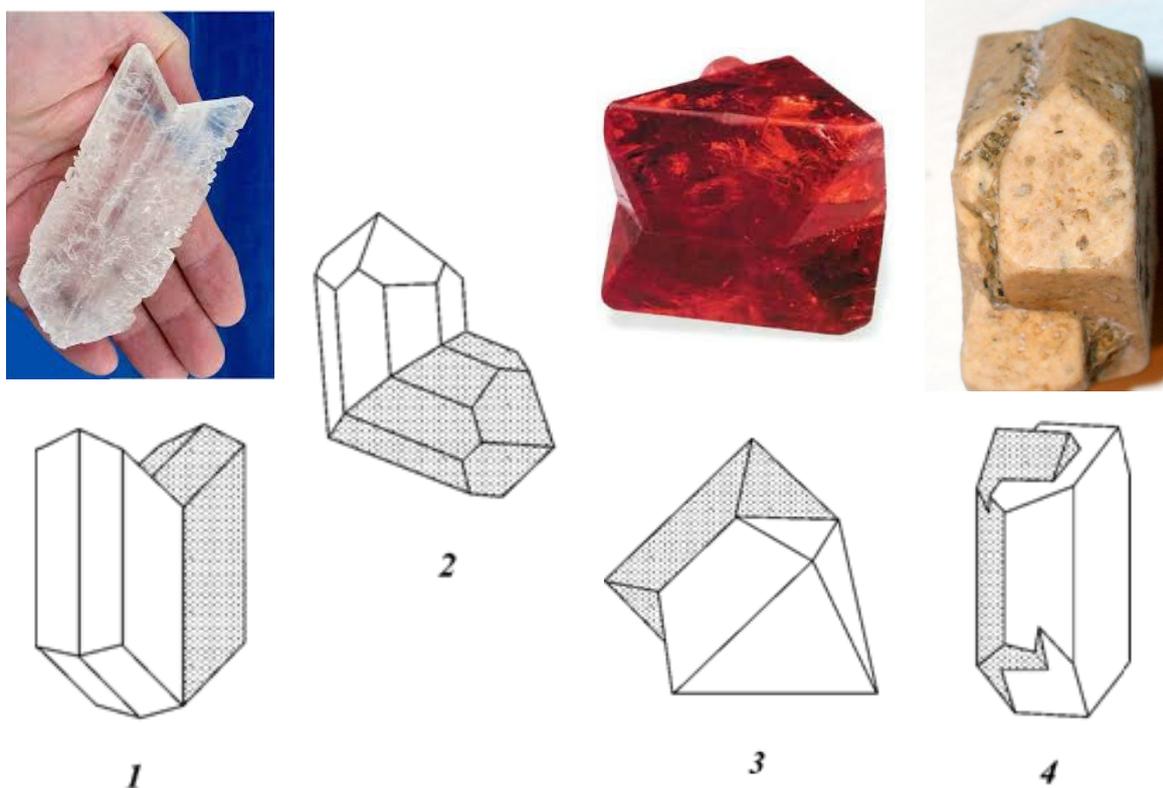


Рис. 64. Двойники гипса (1), касситерита (2), шпинели (3), ортоклаза (4)

Плоскостью срастания называется плоскость между сросшимися кристаллами. Плоскость срастания в одних случаях совпадает с двойниковой плоскостью (например, у двойника гипса), в других – не совпадает, например, у двойника ортоклаза (рис. 64, 4). Линия пересечения плоскости срастания и грани кристалла называется *двойниковым швом*.

Двойниковая плоскость, двойниковая ось и плоскость срастания определяют закон двойникования сросшихся кристаллов. Законы двойникования различны и для отдельных минералов имеют свои названия. Например, шпинелевый закон (рис. 64, 3), карлсбадский закон (рис. 64, 4). Законы двойникования подробно рассматриваются в курсах минералогии и петрографии.

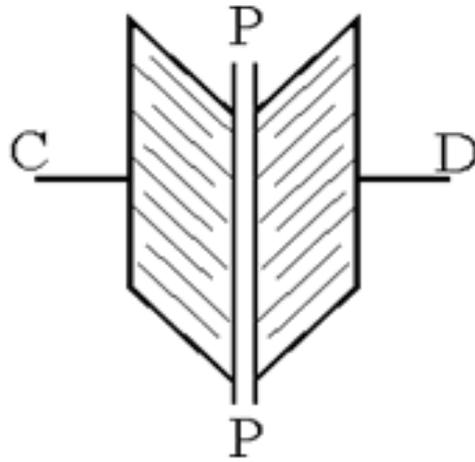
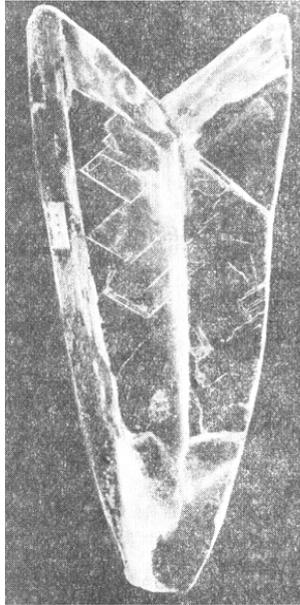
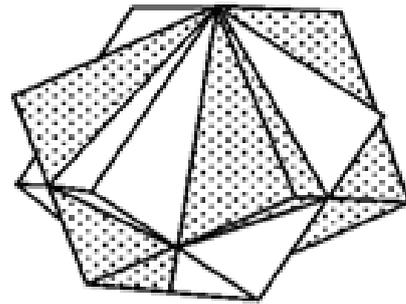


Рис. 65. Двойник гипса:
PP – двойниковая плоскость и плоскость срастания, *CD* – двойниковая ось



2

Рис. 66. Двойники прорастания ставролита (1), флюорита (2)

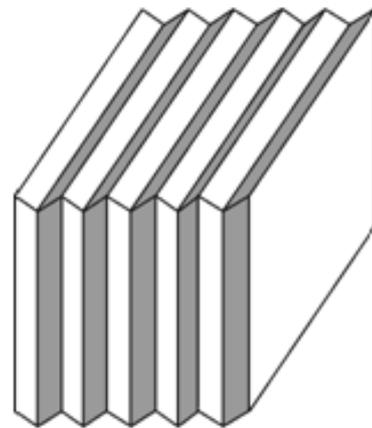


Рис. 67. Тройник прорастания ставролита Рис. 68. Полисинтетический двойник

*Двойниками прорастания называют такие двойники, в которых один кристалл насквозь прорастает в другой (рис. 66). В случае срастания трех, четырех, пяти кристаллов и более различают соответственно *тройники, четверники, пятерники* и т. д. (рис. 67).*

Полисинтетические (сложные) двойники представляют собой серию кристаллов, сросшихся так, что каждые два соседних ориентируются относительно друг друга в двойниковом положении, а кристаллы, следующие через один, являются взаимно параллельными (рис. 68). Такие двойники особенно характерны для плагиоклазов и кальцита.

Таким образом, заканчивая описание реальных кристаллов, подчеркнем, внешняя форма их имеет весьма важное значение как для целей диагностики минералов, так и в практическом отношении. Несмотря на изменчивость внешней формы кристаллов, обусловленную условиями его роста, она очень часто остается характерной для кристаллов данного минерала. Это обстоятельство позволяет определить минерал по форме его кристаллов, не применяя кристаллооптических исследований, а также дорогостоящих химических, рентгеноспектрометрических и других видов анализов. Например, ставролит встречается в виде крестообразных двойников прорастания, плагиоклазы – в форме полисинтетических двойников, гипс – наиболее обычен в форме двойников, называемых в минералогии «ласточкин хвост», грани кубических кристаллов пирита, как правило, несут штриховку, параллельную трем его ребрам, на гранях призмы кварца она поперечная.

9.3. Усложненные формы кристаллов

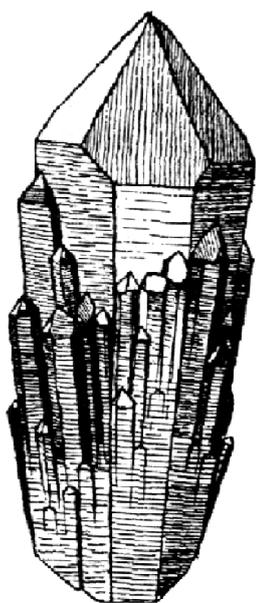


Рис. 69. Расщепленный кристалл кварца

Природные кристаллы характеризуются не только рассмотренными выше отклонениями от геометрически правильных форм и разного рода сrostками, но очень часто развиваются с особенными усложнениями своих форм. Рассмотрим некоторые типичные примеры таких усложнений.

Расщепленные кристаллы (рис. 69). Подобные усложнения наиболее выражены на призматических формах кристаллов – единая призма начинает расщепляться на несколько меньших индивидов, каждый из которых несколько отклоняется в сторону. В итоге расщепленный кристалл напоминает «веер» или «сноп» более мелких кристаллов, расходящихся в стороны, аналогичных исходному.

Расщепленный рост наблюдается и в таблитчатых кристаллах (гематит), и в кубических кристаллах (галенит). В первом случае образуется своеобразный агрегат гематита – железная роза (рис. 70), в случае галенита кристалл приобретает блоковое строение (рис. 71).



Рис. 70. Расщепленный таблитчатый кристалл гематита



Рис. 71. Блоковое строение кристалла галенита

Причины, приводящие к расщеплению кристалла, связаны с особенностями роста. Одна из таких причин – наличие в растворе микропримесей, соизмеримых по размерам с толщиной нарастающего слоя, которые не входят в структуру растущего кристалла, но вызывают отклонение нового слоя на 20–30°. Подобные «отщепления» периодически повторяются, что и приводит к формированию сноповидных образований кристаллов. Другой причиной могут быть микродеформации растущего кристалла за счет механических воздействий на границах двойников и микроблоков.

Сферолиты. Расщепленный рост кристаллов может привести к образованию сферолитов – агрегатов округлой формы. Расщепление призматического кристалла происходит симметрично с обоих концов, образуется веероподобный агрегат, при дальнейшем росте верхний и нижний «вееры» смыкаются в единый сферический агрегат (рис. 72). Примером могут служить агрегаты малахита.

Скипетровидные кристаллы (рис. 73). Подобные формы кристаллов образуются при неоднократном росте кристалла, то есть в случае развития нескольких генераций минерала. Например, на рис. 73 кварц первой генерации представлен призматическим кристаллом, кварц второй генерации имеет дипирамидальные кристаллы без граней призмы, рост этих кристаллов зарождался на вершинах призм.

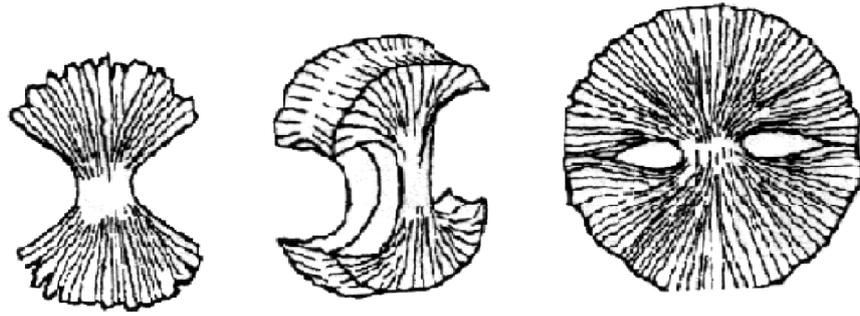


Рис. 72. Расщепление кристаллов приводит к формированию сферолита

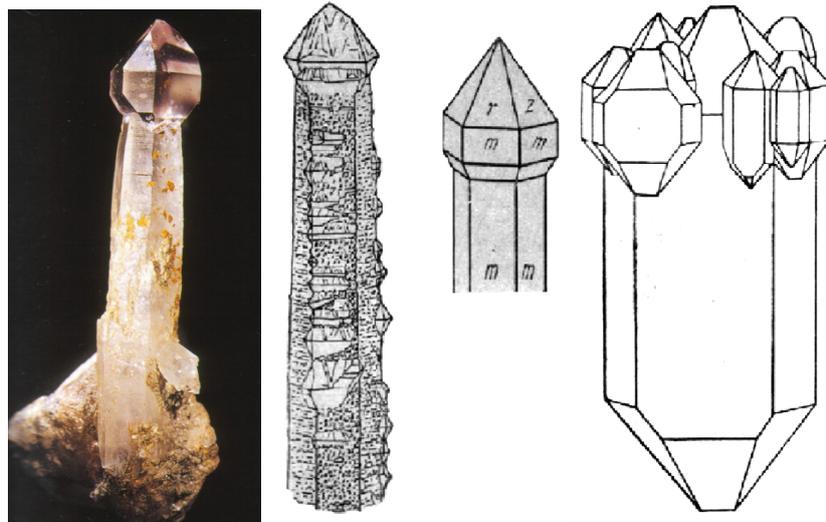


Рис. 73. Скипетровидные кристаллы кварца

Иногда усложнения форм кристаллов приводит к образованию винтообразно скрученных кристаллов (рис. 74). Как правило, скрученные кристаллы характеризуются неоднородностью и мозаичным строением.

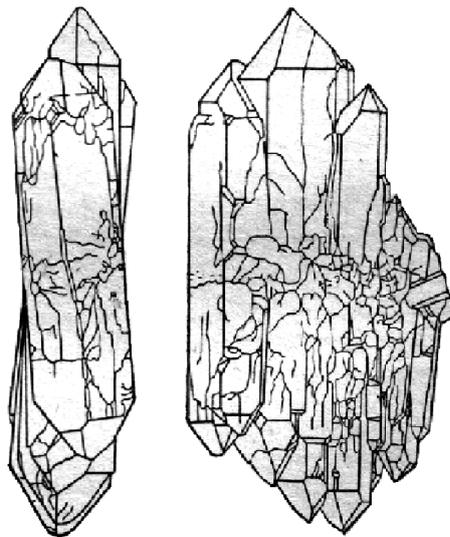


Рис. 74. Скрученные кристаллы кварца

9.4. Внутреннее строение кристаллов

Развитие реальных кристаллов, как отмечено выше, контролируется различными факторами среды, что выражается в тех или иных искажениях внешних форм. Изменения условий кристаллизации проявляются не только на внешней форме кристаллов, но и на внутреннем их строении. Особенности внутреннего строения кристаллов обуславливаются двумя главными причинами: периодическими или спорадическими изменениями условий роста, а также индивидуальными свойствами поверхности каждой из растущих граней. Первая причина определяет *зональное строение кристаллов*, вторая – *секториальное*.

Зональное строение кристаллов (рис. 75) связано с изменениями химического состава раствора, питающего растущий кристалл. В процессе послойного роста кристалла изменения химизма раствора приводят к тому, что слои вещества отличаются по химическому составу (и по физическим свойствам). В результате развиваются зоны различной окраски, параллельные грани кристалла, отличающиеся вариациями химизма. Подобная зональность, например, часто наблюдается в поперечном сечении кристаллов граната андрадит-гроссулярового состава, в кристаллах плагиоклазов.

Секториальное строение кристаллов развивается по иным причинам. Как известно, разные грани кристалла соответствуют разным плоским сеткам пространственной решетки, плоские сетки отличаются по своим параметрам. Разница в строении плоских сеток приводит к тому, что в процессе роста кристалла каждая из них обладает разной способностью поглощать примеси из питающего раствора. В результате на одном и том же кристалле грани различных простых форм несколько отличаются по химизму, например, по количеству примесных элементов. Избирательность в поглощении элементов выдерживается на всем протяжении роста кристалла, поэтому секториальное строение его выражается в развитии *пирамид роста* (или *пирамид нарастания*). Основанием такой пирамиды служит грань кристалла, а вершиной – его центр (рис. 76).

Выше отмечалось, что развитие тех или иных форм на кристалле может зависеть от концентрации примесных элементов в растворе, от степени насыщенности раствора. Указанные особенности непосредственно связаны с развитием пирамид роста, например, на гексаэдре пирита, растущем в растворе, насыщенном кобальтом, развиваются грани октаэдра, появление их обусловлено поглощением Со плоской сеткой (111), что и делает возможным развитие соответствующей грани. Наконец, как в случае зонального строения с различным составом зон, пирамиды роста кристалла различаются по химизму и, следовательно, по физическим

свойствам. В большинстве случаев эти различия незначительны, но известны кристаллы, обнаруженные В.А. и В.И. Поповыми в вулканических возгонах на Камчатке (Булах, 2002), в которых пирамиды роста разных граней отвечают разным минералам – атласовиту и набокоиту, близким по химическому составу, но эти же исследователи обнаружили единые кристаллы с секторами роста, сложенными минералами разного состава: Ва-содержащий горсейксит и Sr-содержащий гоэцит.

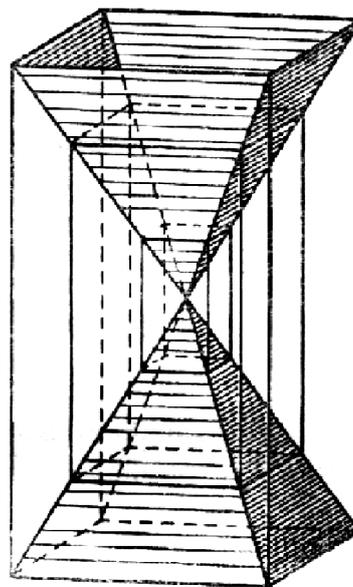
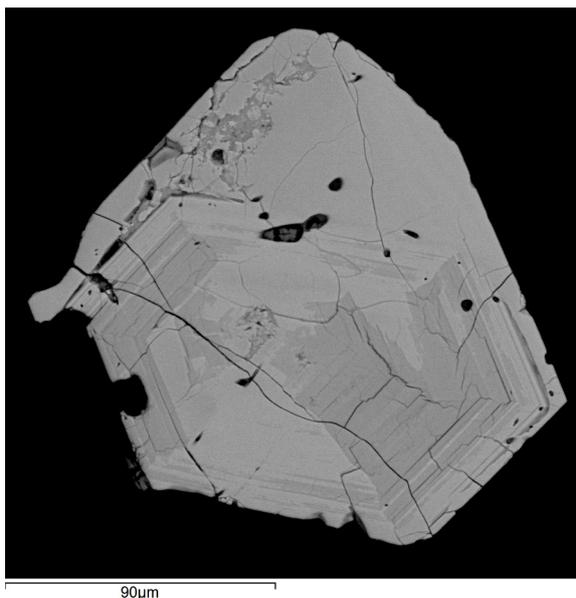


Рис. 75. Зональное строение циркона Рис. 76. Пирамиды роста кристалла

9.5. Включения в кристаллах

Включения в кристаллах встречаются довольно часто, по своему типу они делятся на гомогенные (однородные) – жидкие, твердые, газообразные, и гетерогенные (разнородные), в которых присутствуют несколько фаз (газово-жидкие и т. д.). В зависимости от того, как образуются включения, среди них выделяют: *реликтовые*, *сингенетические*, *эпигенетические*.

Реликтовые включения представлены твердой фазой, небольшими кристаллами или зернами, присутствовавшими в растворе (расплаве) во время роста кристалла-хозяина, образовавшимися ранее. Растущий кристалл взаимодействует с препятствием по-разному: может его растворить, или растущая грань отодвинет помеху, но, если этого не происходит, кристалл захватывает чужеродные тела и содержит их в себе в качестве механической примеси. С включениями остаточных твердых фаз связано образование кристаллов-фантомов (рис. 77). На определенном этапе роста по поверхностям граней располагаются включения дру-

гого минерала непрерывным слоем, затем они перекрываются следующими слоями растущего кристалла и остаются внутри, оконтуривая своим расположением фантом (от франц. *fantôme* – призрак) кристалла на предыдущем этапе роста. Особенно наглядны кристаллы-фантомы в прозрачных минералах, как на рис. 77 – кристаллы горного хрусталя, с фантомами, очерченными тонкими чешуйками хлорита.

Намного больший интерес для исследований представляют *сингенетические включения* – захваченные кристаллом фрагменты минералообразующей среды. По агрегатному состоянию такие включения могут быть газовыми, жидкими, твердыми, а также гетерогенными – газожидкими, жидкими с твердыми фазами (рис. 78). Обычно размер таких включений от сотых до десятых долей миллиметра, газ чаще всего представлен CO_2 , твердая фаза – мельчайшие кристаллы FeS , NaCl , углекислого натрия, других солей. Сингенетические включения представляют собой законсервированные в кристалле порции минералообразующего раствора. Существует несколько методик изучения фазового состава включений и их поведения при нагревании для получения сведений о температуре, давлении и характере среды минералообразования. В исследованиях используются два основных принципа, первый из которых – гомогенизация включений.

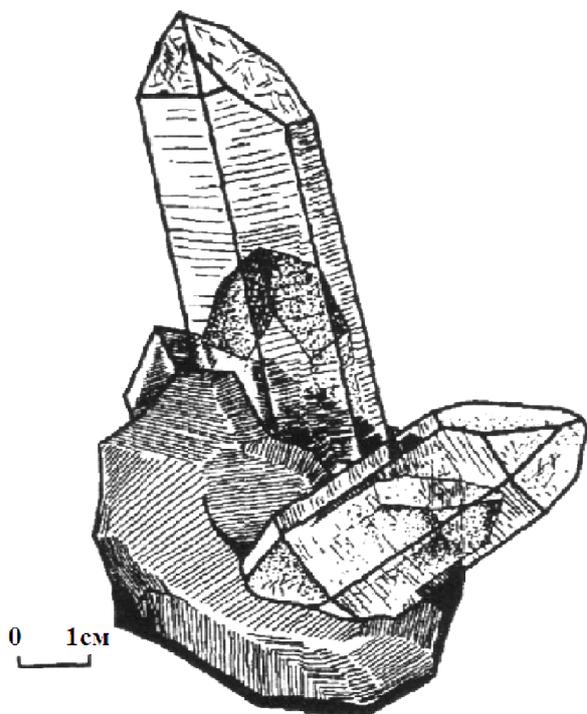


Рис. 77. Фантомные кристаллы кварца



Рис. 78. Включения в кристаллах

В этом случае кристалл с включениями нагревается до температуры, при которой включения, состоящие из разных фаз, гомогенизируются (превращаются в однородную фазу), полученная температура используется для дальнейших выводов о температуре питающего раствора. Данный метод удобен для прозрачных кристаллов, когда возможно наблюдение газовой-жидких включений при нагревании. В случае непрозрачных кристаллов нагревание продолжается до взрыва включений, что фиксируется звуковыми датчиками.

Эпигенетические включения не связаны непосредственно с ростом кристалла. Они образуются в кристаллах позже, например, заполняют трещины более поздним материалом. Обычно эти включения твердые – мелкие жилки, цепочки кристаллов, зерен поздних минералов, но встречаются и газовой-жидкие – остатки поздних растворов, проникающих также по трещинкам после формирования кристалла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии изложены элементарные основы науки о кристаллах, позволяющие студенту получить первые представления о кристаллическом веществе и кристалле как составных частях минералов и горных пород. Понимание взаимосвязи внутреннего строения, симметрии и внешней формы кристаллов во многом определяет успешное изучение последующих дисциплин минералогии и петрографии. Форма кристалла – отражение физико-химических условий среды кристаллизации. В настоящее время кристалломорфология минералов широко используется для решения таких вопросов, как условия образования (температура, давление, химизм среды) минералов, выяснение которых позволяет более целенаправленно проводить поиски месторождений полезных ископаемых.

Весьма актуальны проблемы роста кристаллов в связи с возрастающими потребностями науки и техники в кристаллах со специфическими свойствами. В настоящее время бóльшая часть применяемых в науке и технике кристаллов выращивается в лабораториях и на специализированных предприятиях, и искусственно выращенные кристаллы с заданными свойствами все больше вытесняют природные. В то же время природные монокристаллы оптического кварца, флюорита, кальцита и особенно алмаза пока остаются более высококачественными по сравнению с синтетическими. Кроме того, в лабораториях получают кристаллы веществ, природные аналоги которых не существуют. Таковы сегнетова соль, фианит, большинство полупроводниковых материалов (германий, карбид кремния и их аналоги).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Дайте определение кристаллографии как науки. Содержание кристаллографии.
2. Какие вопросы рассматривает геометрическая кристаллография?
3. Назовите агрегатные состояния твердых тел.
4. Дайте определение аморфного тела и кристаллического.
5. Что называется кристаллом и чем обусловлена геометрически правильная форма кристалла?
6. Что называется пространственной (кристаллической) решеткой?
7. Какие грани и ребра чаще всего проявляются на реальных кристаллах в связи с внутренним их строением?
8. Раскройте три основные свойства кристалла.
9. Что понимается под однородностью кристаллов?
10. Что называется анизотропностью кристаллов? Приведите примеры анизотропных свойств известных вам минералов.
11. Что называется симметрией кристаллов?
12. Дайте определение элементов симметрии.
13. Что называется осью симметрии, порядком оси симметрии?
14. Какие оси симметрии существуют в кристаллах? Почему в кристаллах невозможны оси симметрии пятого порядка и выше шестого?
15. Что называется плоскостью симметрии? Как проходят плоскости симметрии в кристаллах?
16. Дайте формулировку центра симметрии. Назовите правило для его определения.
17. Что называется классом симметрии, сингонией, категорией?
18. Перечислите известные сингонии, охарактеризуйте их.
19. Для чего в кристаллографии используются системы координатных осей?
20. Что называется системой кристаллографических осей? Как они проводятся в кристалле?
21. Какие кристаллографические оси применяются для установки кристаллов? Охарактеризуйте их.
22. Что называется простой формой кристалла и комбинацией?
23. По каким признакам дается название простых форм кристаллов?
24. Дайте формулировку закона целых чисел (закона Аюи) и поясните его смысл.
25. В чем заключается рациональность отношений параметров?
26. Почему отношение параметров двух граней равно целым, простым и сравнительно малым числам?

27. Что называется символами грани и почему они являются обязательной характеристикой кристаллов?
28. Что называется параметрами и индексами кристалла? Как они определяются?
29. Что называется единичной гранью? Какую грань принимают за единичную в кубической, тетрагональной и ромбической сингониях?
30. Могут ли две грани кристалла иметь одинаковые символы?
31. Какой индекс в символе получают грани, параллельные одним, двум координатным осям?
32. Каким простым формам соответствуют символы $\{111\}$, $\{100\}$, $\{110\}$, $\{hk0\}$ в кубической, тетрагональной и ромбической сингониях?
33. Охарактеризуйте принцип и пути образования кристаллов.
34. Как растет кристалл?
35. Перечислите факторы, влияющие на рост и форму кристаллов.
36. Что такое концентрационные потоки и как они влияют на форму растущего кристалла?
37. В чем сущность закона постоянства углов на кристаллах? Его значение.
38. Опишите устройство и принцип работы гониометра.
39. Какие кристаллы называются идеальными и реальными?
40. Что называется скульптурой грани?
41. Какие виды усложнений наблюдаются на поверхности реальных кристаллов?
42. Какие вам известны усложненные формы кристаллов? Назовите причины их появления.
43. Какие типы сростаний кристаллов известны?
44. Что называется двойником? Назовите элементы двойника и дайте их определение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Булах А.Г. Общая минералогия : учебник. – 3-е изд. – СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2002. – 356 с.
2. Егоров-Тисменко Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия : учебник / Ю.К. Егоров-Тисменко ; под ред. В.С. Урусова. – М. : КДУ, 2010. – 588 с.
3. Попов Г.М., Шафрановский И.И. Кристаллография. – М. : Высшая школа, 1972. – 351 с.
4. Флинт Е.Е. Практическое руководство по геометрической кристаллографии. – М. : Недра, 1956. – 208 с.
5. Шафрановский И.И., Алявдин В.Ф. Краткий курс кристаллографии. – М. : Высшая школа, 1984. – 120 с.

Дополнительная

6. Аншелес О.М. Начала кристаллографии. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1952. – 276 с.
7. Банн Ч. Кристаллы. Их роль в природе и науке. – М. : Мир, 1970. – 310 с.
8. Евзикова И.З. Поисковая кристалломорфология. – М. : Недра, 1984. – 143 с.
9. Козлова О.Г. Рост и морфология кристаллов. – М. : Изд-во МГУ, 1972. – 303 с.
10. Костов И. Кристаллография. – М. : Мир, 1965. – 528 с.
11. Кушта Г.П. Введение в кристаллографию. – Львов : Изд-во «Вища школа», 1976. – 238 с.
12. Новоселов К.Л. Руководство к лабораторным занятиям и самостоятельной работе по геометрической кристаллографии. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006. – 52 с.
13. Wenk H.-R., Bulakh A. Minerals. Their constitutions and origin. – Cambridge University press, 2004. – 646 p.

Учебное издание

НОВОСЕЛОВ Константин Леонидович

ОСНОВЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИИ

Учебное пособие

Корректурa *Е.А. Тетерина*
Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 27.03.2015. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 4,25. Уч.-изд. л. 3,84.
Заказ 250-15. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru