

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Э.С. Соседков, Е.К. Максименко

# ОСНОВЫ КРИСТАЛЛОГРАФИИ И МИНЕРАЛОГИИ

(УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ  
НЕГЕОЛОГИЧЕСКИХ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ)

Тюмень

2009

УДК 548+549(075)

ББК 26.303я73

С66

**Соседков, Э. С.**

С66 Основы кристаллографии и минералогии : учебное пособие для студентов негеологических высших учебных заведений / Э. С. Соседков, Е. К. Максименко. – Тюмень : ТюмГАСУ, 2009. – 220 с. : XXI л. ил.

В учебном пособии приведены основные сведения по геометрической кристаллографии, ее основным законам, формам кристаллов, их симметрии и классификации; отдельные сведения из кристаллохимии, в которой даны основы строения кристаллов и связи их с внешней формой, физическими и химическими свойствами.

Основные сведения по минералогии включают свойства минералов, их происхождение, классификацию, определение, описание и практическое использование.

Рекомендовано для студентов дневного и заочного обучения негеологических университетов и технических вузов со строительной специализацией, в которых изучается инженерная геология.

Рецензенты:

Максимов Евгений Максимович,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор Тюменского государственного нефтегазового университета.

Кравцов Юрий Васильевич,  
ведущий научный сотрудник ООО «ТюменНИИгипрогаз», кандидат технических наук.

Зимакова Галина Александровна,  
доцент, кандидат технических наук, зав. кафедрой «Производство строительных изделий и конструкций» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время выпуск новых учебников по инженерной геологии после более чем двадцатилетнего перерыва возобновился, но в них нет даже элементарных сведений из геометрической кристаллографии. Потребность в учебных пособиях по основам кристаллографии, кристаллохимии и минералогии будет возрастать и в будущем в связи с переходом на новые методы обучения студентов, в которых основную роль играет самостоятельное изучение предметов.

**Основная цель** настоящего пособия – наряду с основами минералогии изложить также элементы кристаллографии и кристаллохимии, что будет способствовать лучшему пониманию свойств минералов при их изучении, диагностике и описании. Кроме того, было бы неправомерно искусственно отделять одну часть единого комплекса научных знаний от другой. Поэтому предлагаемое учебное пособие представлено двумя отдельными частями, тесно связанными между собой.

**Первая часть – «Основы кристаллографии»** содержит краткую информацию о том, как зарождаются, растут и разрушаются кристаллы, о кристаллической решетке, симметрии и законах кристаллографии, идеальных и реальных формах кристаллов, их классификации, отдельных сведениях кристаллохимии, минимум практических занятий для закрепления пройденного материала.

При составлении пособия для характеристики содержания указанных выше тем в основном служила информация из учебников по кристаллографии, являющихся уже единичными в библиотеках: Г.М. Попова и И.И. Шафрановского, Шафрановского и Алявдина, М.П. Шаскольской, Б.К. Кантора и др. Все они приведены в списке использованной литературы, и в самом тексте на них сделаны ссылки.

**Вторая часть – «Основы минералогии»** знакомит студентов с происхождением минералов, их химическим составом, классификацией, внешними диагностическими признаками, определением, кратким описанием и использованием минералов в различных отраслях народного хозяйства.

Данные для этой части пособия приведены из учебников, монографий и статей, содержащихся в списке литературы.

Представленное учебное пособие может быть использовано как единым курсом по специальности **«Производство строительных изделий и конструкций»**, так и отдельными частями, в зависимости от учебных программ,

включающих или «Основы кристаллографии», или «Основы минералогии». Вторая часть – «Основы минералогии» рекомендована студентам специальности **«Промышленное и гражданское строительство»** очного, заочного или дистанционного обучения и др.

Данное пособие окажет неоценимую помощь при изучении, диагностике и описании кристаллов и минералов в лаборатории и при выполнении домашнего задания, особенно в филиалах дистанционного обучения, где учебных коллекций кристаллов и минералов нет. Кроме текста в пособии более 20 листов вкладок цветных фотографий и 95 черно-белых рисунков, охватывающих почти все изучаемые на I и II курсах минералы.

Часть минералов для цветных фотографий (отмечены списком в конце пособия) была предоставлена **В.К. Коркуновым** – исследователем Приполярного Урала. Основной же объем цветных фотографий выполнен инженером Тюменского государственного архитектурно-строительного университета **И. Дружининым** по образцам учебной коллекции и геологического музея, созданного при самой активной помощи зав. кафедрой «Механика грунтов, основания и фундаменты» доктора технических наук **С.Я. Кушнира**, работавшего в ТюмГАСУ (ТюмИСИ) с 1974 по 1998 годы.

Всем названным лицам авторы выражают глубокую благодарность.

**ЧАСТЬ I**

**ОСНОВЫ  
КРИСТАЛЛОГРАФИИ**



## КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, ПРЕДМЕТ ИЗУЧЕНИЯ, СОСТАВ И СВЯЗЬ С ДРУГИМИ НАУКАМИ

**Кристаллография** – это наука о кристаллах, изучающая их возникновение и рост, внешнюю форму, внутреннее строение, физические свойства и связь их со средой. **Кристаллы** – это выпуклые многогранники с плоскими гранями и прямолинейными ребрами.

Остановимся кратко на важнейших этапах развития кристаллографии.

Кристаллография как наука существует с конца XVII века. Но более точной датой рождения кристаллографии ученые считают 1669 год – год установления датским ученым Н. Стеноном (1638–1686) **первого основного закона кристаллографии – закона постоянства углов между гранями кристаллов**. Размеры кристаллов конкретного вещества, их внешний вид, площади и контуры граней изменяются, но для всех кристаллов данного вещества неизменными остаются лишь углы.

В 1749 году, т.е. спустя 80 лет после открытия Н. Стенона, М.В. Ломоносов впервые связал закон постоянства углов с понятием о внутреннем строении кристаллов. Эту дату стали считать датой зарождения российской кристаллографии. Используя свою корпускулярную теорию, мысленно складывая корпускулы, имеющие шарообразную форму, М.В. Ломоносов объяснил различные сечения «кристаллических фигур» на примере поваренной соли и селитры – квадратное и шестиугольное соответственно.

Еще по истечении 37 лет французский кристаллограф Ж.Б. Роме Делиль (1736–1790) на основе многочисленных измерений подтвердил наблюдения Стенона и Ломоносова и дал общую формулировку закона: **углы между соответственными гранями во всех кристаллах одного и того же вещества постоянны**.

Но это возможно только **при одной и той же температуре ( $T$ ) и одинаковом давлении ( $P$ )**, дополнение было сделано учеными позднее. После этого начались работы по систематическому измерению двугранных углов естественных кристаллов – минералов. В России измерением кристаллов занимались П.В. Еремеев, М.В. Ерофеев и др. Особенно тщательными были измерения Н.И. Кокшарова.

На девять лет раньше Роме Делиля, в 1774 году, французский ученый

Р.Ж. Гаюи (1743–1822) открывает *второй закон кристаллографии – закон целых чисел, о рациональности двойных отношений отрезков, отсекаемых гранями на ребрах кристалла*. Закон носит его имя и лежит в основе современного учения о кристаллографических символах.

Со второй половины XVII века, весь XVIII и первое десятилетие XIX веков кристаллография как часть минералогии была одной из ее глав, но в конце XIX в. выделилась в самостоятельную науку. Основным содержанием ее было наблюдение над природными кристаллами, имеющими естественную форму правильных многогранников, определение их симметрии (своеобразной закономерности, наблюдаемой в расположении предметов или их частей на плоскости и в пространстве). Симметрия при исследовании кристаллов стала важным специфическим методом кристаллографии (отдельные исследователи стали называть его законом симметрии).

К этому же периоду была разработана классификация кристаллов, базирующаяся на их макросимметрии (элементах симметрии). В итоге русским ученым А.В. Гадолиным было математически выделено 32 класса (вида) симметрии, разделенных на 7 сингоний, и на основе микросимметрии (атомно-решетчатого строения кристаллов) выдающимся русским кристаллографом Е.С. Федоровым было выделено 230 кристаллографических групп симметрии кристаллов. Это явилось величайшим достижением русской науки.

Атомно-решетчатое (ретикулярное) строение кристаллов с трудом признавалось некоторыми исследователями, пока не была открыта дифракция рентгеновских лучей. Оказалось, что природные кристаллы – лучшие дифракционные решетки, чем изготовленные вручную для прохождения рентгеновских лучей.

Открытием дифракции рентгеновских лучей в 1912 г. Лауэ доказал справедливость закономерного строения кристаллов как естественных дифракционных решеток. Открытие дифракции рентгеновских лучей положило начало экспериментальному исследованию атомной структуры кристаллических веществ – так появился метод рентгеноструктурного анализа. Пионером в области рентгеноструктурного анализа в России был Г.В. Вульф – второй крупнейший кристаллограф, у которого учеником был А.В. Шубников, инициатор внедрения кристаллографии в технику и промышленность, создавший Институт кристаллографии при Академии наук СССР, единственный в мире. Наряду с указанными основными методами в кристаллографии чуть позже начали применять микроскопию во всех ее вариантах (от простых



поляризационных микроскопов до очень сложных – электронного, электронографического, нейтронографического и др.).

Производство кристаллохимических анализов привело к созданию молодой науки – кристаллохимии. **Кристаллохимия** выявляет законы строения и их связь с химическим составом кристаллов. Из русских ученых выдающийся вклад в кристаллохимию внес академик Н.В. Белов (1891–1982). В наши дни изучены структуры кристаллических веществ почти всех неорганических природных соединений (20 000).

Если первоначально вплоть до середины XX века промышленное использование идеальных однородных кристаллов – монокристаллов, необходимых для технических целей, ограничивалось почти исключительно природными ювелирными самоцветами, то позднее из-за широкого использования алмазов, слюды, горного хрусталя, исландского шпата и мн. других потребность в них резко возросла и уже не могла быть обеспечена из природных месторождений. Началось искусственное получение технически важных кристаллов в промышленных масштабах для использования оптических, электрических и других их свойств. В связи с этим монокристаллы стали выращиваться в большом количестве для различных областей народного хозяйства.

Тщательное изучение природных явлений – изоморфизма и полиморфизма, открытых в кристаллографии в 1819 году немецким ученым Э. Митчерлихом (1794–1863), привело к формированию этих двух научных направлений, а вместе с ними появились новые термины: индивид, минеральный вид (основа кристаллохимической классификации) и разновидность.

**Изоморфизм** (равноформность) и **полиморфизм** (многообразный, многоформный) широко развиты в природе. Первый допускает изменение химического состава кристаллов и минералов с сохранением формы, а второй наоборот, сохранение химического состава, но с изменением формы кристаллов.

Совершенный кристалл и зерно горной породы – равноправные **индивиды**. Они существуют благодаря кристаллической структуре и упорядоченному расположению в ней атомов. Теперь стало ясно, что минеральные виды представлены минеральными индивидами, поэтому для познания видов надо изучать индивиды.

**Минеральный вид** – это минеральные индивиды одинаковой структурной группы, химического состава, существующие в определенных термодинамических условиях.

**Разновидность** – индивид, отличающийся особенностями (например, окраской). У кварца кристаллы аметиста, мориона, горного хрусталя и многие другие – разновидности.

Учение о кристаллических индивидах и агрегатах развивает профессор Д.П. Григорьев (1965). В то же примерно время А.С. Поваренных устанавливает закономерности в распределении минеральных видов по сингониям, классам симметрии и пространственным группам. Многие делают для развития науки кристаллографии И.И. Шафрановский и его ученики (например В.Ф. Алявдин).

В современный период кристаллография связана со многими науками.

Приведенная на рис. 1 схема указывает на тесную связь кристаллографии с физикой, химией и минералогией. Стрелки на схеме показывают направление зависимости и взаимного использования. Например, кристаллография широко пользуется математикой, сама же дает ей сравнительно мало, но зато в обратном отношении находятся петрография и металлография, изучающие строение металлов и кристаллов.

Разумеется, связи кристаллографии с другими науками в настоящее время гораздо обширнее, и они непрерывно развиваются, а на схеме № 1 показан небольшой их фрагмент.

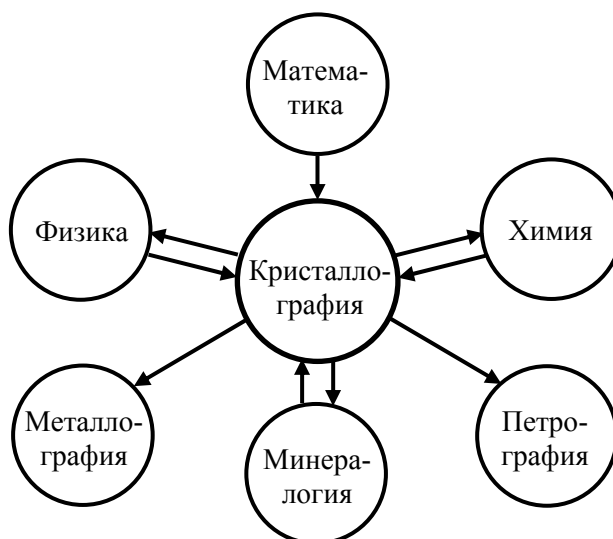


Рис. 1. Схема связи кристаллографии с другими науками

Значение кристаллографии очень велико:

– знание основ кристаллографии необходимо для специалистов широкого профиля – не только для геологов, строителей, металлургов и т.д., но и технологов различных областей промышленности и строительного производства;

– кристаллография дает ключ к изучению и познанию структуры и физических свойств кристаллических материалов, необходимых для различных областей техники и строительной практики.

## ЗАРОЖДЕНИЕ, РОСТ И РАСТВОРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

### ЗАРОЖДЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Зарождение кристаллов обусловлено *кристаллизацией* – процессом перехода вещества в кристаллическое состояние, которое отличается строго закономерным, упорядоченным расположением атомов и ионов (заряженных частиц).

Кристаллизация преобразует жидкое (растворы и расплавы), твердое аморфное и газообразное состояния в твердое кристаллическое. Почти вся земная кора возникла путем кристаллизации.

Кристаллизация происходит только из пересыщенных растворов и переохлажденных расплавов и сопровождается выделением тепла, а нередко световыми и электрическими эффектами. Величина пересыщения (переохлаждения), движения среды, наличие примесей – основные факторы, определяющие ход кристаллизации и свойств ее продуктов.

Выделяют две стадии процесса кристаллизации: зарождение кристаллов и их рост, независимо от того, в какой фазе он происходит – в жидкой, газовой или твердой.

Первая стадия характерна тем, что самопроизвольно образуется субмикроскопический зародыш кристаллической фазы, способный расти. Впоследствии стали утверждать, что самопроизвольное зарождение происходит редко и с трудом.

Обычно кристаллизация в одной фазе – однородной физико-химической системе, не имеющей поверхностей раздела (например, водные растворы кислот, солей и т.д.), – возникает от наличия мельчайших частичек кристаллизующегося вещества (достаточна частичка  $1 \cdot 10^{-9}$  г), играющих роль затравок. Если кристаллизация происходит только в одной однородной фазе, она называется *гомогенной*. Но кристаллы могут зарождаться, когда зародыши образуются в физико-химической системе, состоящей из нескольких фаз – однородных частей, имеющих различные физические и химические свойства и отделенных друг от друга поверхностями раздела (например, вода и пар).

Кристаллизация при наличии нескольких расплавов однородных фаз в системе называется *гетерогенной*. На кристаллизацию влияет степень переохлаждения расплавов и пересыщения растворов. Если степень будет крайне мала, то возникновение кристаллизации будет незначительно или вовсе может не начаться.

Кристаллизация не происходит, если удалось уничтожить центры кристаллизации перегревом или удалением путем фильтрации. Так, воду удалось переохлаждать до  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На второй стадии осуществляется дальнейший рост нового кристалла на затравках. Затравки для образования новых кристаллов являются центрами кристаллизации, от них зависят свойства получаемых продуктов. Например, чем больше центров кристаллизации, тем мельче кристаллы в продуктах кристаллизации и т.д.

## РОСТ КРИСТАЛЛОВ

В свое время было предложено много теорий роста кристаллов, но сейчас они представляют лишь исторический интерес.

Ниже остановимся кратко на идеях, которые выдержали проверку временем. Характеристика роста кристаллов дается по материалам Б. Кантора (1985).

В конце XIX века Дж.У. Гиббс (выдающийся американский физик, один из основоположников термодинамики) установил важнейшие энергетические закономерности, управляющие процессами зарождения и роста кристаллов. Он полагал, что в состоянии равновесия между кристаллом и окружающей средой кристалл стремится принять ту форму, которая при данном объеме характеризуется минимумом поверхностной энергии. Равновесная форма кристалла достигается лишь в равновесных условиях, т.е. при бесконечно медленном росте. В реальных условиях роста формы кристаллов могут лишь приближаться к равновесным тем ближе, чем меньше условия роста отклоняются от идеальных.

В 20-х годах XX столетия немецкий физик М. Фольмар теоретически обосновал самопроизвольное зарождение кристалла и вычислил его вероятность. Он высказал также мысль, что на поверхности растущего кристалла возникает особый пограничный слой частиц, которые кристалл адсорбирует из питающего раствора, расплава, пара. Частицы «ползают» по поверхности кристалла пока не найдут своего места на растущих гранях. При росте кристалла наиболее устойчивыми являются медленно растущие грани.

В 1927 г. В. Коссель в Германии и И.Н. Странский в Болгарии изучали вопрос о том, в каком порядке частицы присоединяются к кристаллу. Учитывая идеально регулярное строение, кристалл должен нарастать идеальными плоскими слоями – ритмично, слой за слоем.

На рис. 2 в виде кубика показаны частицы и три способа их осаждения при росте граней:

- на плоскости грани в произвольном месте (рис. 2, а);
- в двугранный угол, где частицы начинают новую цепочку (рис. 2, б);
- в трехгранный угол – частицы продолжают незаконченный ряд частиц (рис. 2, в).

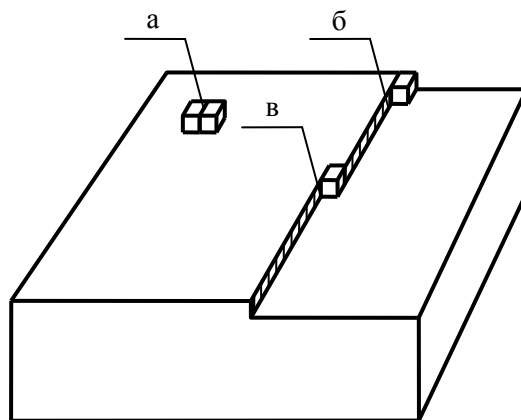


Рис. 2. Три способа посадки частиц во время роста (а, б, в)

Наибольшие трудности при росте возникают, когда наступает очередь образования следующего слоя, первая частица которого должна осесть на гладкую грань в произвольном месте (рис. 2, а). В этом случае связь с кристаллом настолько слаба, что одиночная частица вообще не в состоянии удержаться на грани и сооружение слоя может начаться лишь после того, как несколько частиц консолидируются в так называемый двухмерный однослойный зародыш. Для роста грани требуется, чтобы на ней образовался двухмерный зародыш роста, только после этого происходит самопроизвольное отложение вещества на нем, растут и развиваются грани, образующие кристаллический многогранник.

Чтобы положить начало следующему ряду, частице приходится занять место в двугранном угле (рис. 2, б), что несколько труднее, т.к. связь осуществляется только двумя сторонами кубика.

Последний, третий способ наиболее удачный, т.к. частицы связаны с кристаллом сразу тремя сторонами, что обеспечивает наибольшее сокращение свободной энергии (рис. 2, в). Поэтому достройка ряда получает энергетическое преимущество и пока ряд достраивается, частицы оседают здесь гораздо чаще, чем в других местах растущей грани.

При достаточно высоких перенасыщениях рост кристалла действует с теоретическим прогнозом. Но при низких перенасыщениях кристаллы растут в

сотни и тысячи раз быстрее, чем предсказывает теория, которая рост в этих условиях считает совсем невозможным, так как кристаллы растут вопреки теории.

Но теория Косселя – Странского в целом верна, особенно в большом диапазоне условий. Весь механизм кристаллизации с помощью одной идеи послойного роста целиком представить не удастся. Идея должна быть дополнена. Английский физик-теоретик Ф. Франк предположил, что причина неудач теории Косселя – Странского заключена в ее исходном постулате об идеальной структуре кристалла.

Рост идет беспрепятственно, пока на грани происходит достройка слоя и имеется ступенька, к которой легко пристраиваются частицы. Слабым местом теории оказалось неизбежное исчезновение ступеньки и необходимость ее возобновления.

В 1949 г. Франк высказал следующую мысль, что в действительности на грани имеется не исчезающая ступенька, навивающая на нее не плоские, а спиральные слои. Существование такой ступеньки Франк приписал нарушению регулярности строения реального кристалла, которое он назвал **винтовой дислокацией**: кристалл наращивается непрерывным спиральным слоем – надобность в зарождении нового слоя отпадает. Прямая, вокруг которой закручивается спиральный слой, называется **осью дислокации**.

Идея Франка столь блестяще подтвердилась опытом, что физики принялись искать дислокации и вскоре получили неопровержимые доказательства их образования. Винтовую дислокацию можно представить как частичный сдвиг в кристалле (рис. 3).

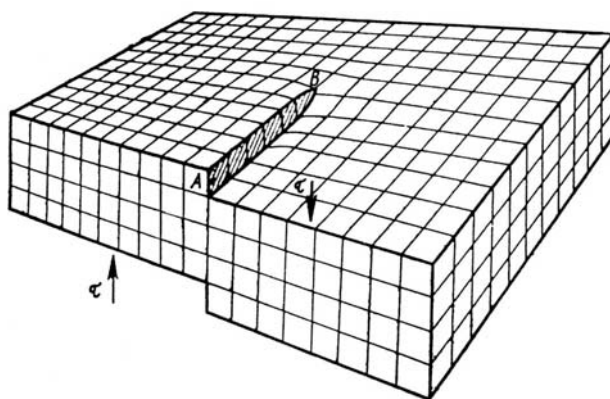


Рис. 3. Винтовая дислокация (по Шаскольской, 1976):  $\tau$  – вектор сдвига

Двугранный угол, который образуется на растущей грани, при встраивании новых частиц не исчезает, а перемещается по винтовой поверхности. Позже ученые установили и другие виды дислокации, например краевую дислокацию (рис. 4).

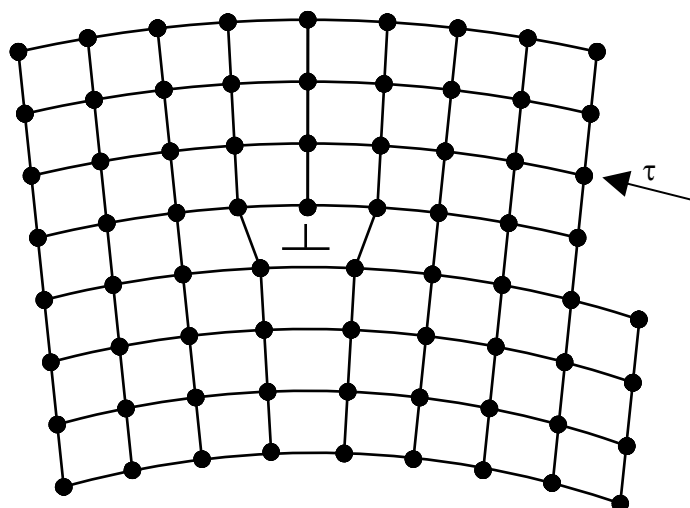


Рис. 4. Схема краевой дислокации (по Шаскольской, 1976 г.):  $\tau$  – вектор сдвига

Рост кристалла происходит последовательно нарастанием на грани тонких слоев. Между окончанием одного слоя и началом роста другого наблюдается перерыв. Чем тоньше слой, тем быстрее его распространение по грани и тем однороднее образующийся кристалл.

Новый слой начинается с образования на грани двухмерного зародыша. Самопроизвольно он образуется с трудом. Повреждение или выступ на кристалле делает излишним образование зародыша, и рост кристалла здесь обеспечивается беспрепятственно (рис. 4).

Как теперь известно, кристаллы имеют атомно-решетчатое строение. В каждом его слое (сетке) узлы решетки (центры частиц) лежат в одной плоскости.

Внутри сетки и на ее краях условия для частиц различны. Внутри связи компенсированы, а на краях некоторые связи остаются свободными и создают внешнее силовое поле, за счет которого растущий кристалл присоединяет к себе новые частицы. На рис. 4 показано, что силовое поле сильнее всего там, где край сетки имеет наибольшую кривизну, – здесь присоединение частиц идет наиболее интенсивно. Кристалл стремится спрямить свои очертания, всякая впадина становится ловушкой для частиц, пока не зарастет и не выровняется (Кантор, 1985).

Растущий кристалл вызывает в среде поднимающиеся вверх концентрационные потоки, потому что, отложив на нижних гранях избыток вещества, они становятся легкими и поднимаются, омывая по пути вышележащие грани кристалла. Лучше всего при этом растут нижние грани, боковые хуже и совсем плохо верхние, из-за чего форма его искажается, что характерно для природных условий. В этом случае в искусственных условиях меняют ориентировку кристалла – его периодически переворачивают или постоянно размешивают

раствор с помощью специальной мешалки с часовым механизмом (Шафрановский, Алявдин, 1984).

Рост кристалла осуществляется за счет новых слоев вещества, откладывающихся на кристаллических гранях. Каждая грань, передвигаясь параллельно самой себе и изменяясь в размерах, образует как бы пирамиду роста, а при изменении состава раствора во время роста кристалл приобретает зональное строение – нарастающие новые слои образуют зоны роста.

При кристаллизации происходит самоочистка кристаллизующего вещества. Это свойство широко используется в технике.

В настоящее время учеными разработаны и успешно применяются различные методы кристаллизации минералов в условиях высоких температур и давления, сходных с природными.

Известно, что кристаллы могут образовываться из расплава – металлы, застывшей магмы – горные породы, газообразных выделений вулканов (сера и др. минералы) и твердого состояния путем *перекристаллизации* (явления, широко распространенного в природе). Например, тонкокристаллический известняк под влиянием высокой температуры при внедрении магмы на контакте перекристаллизовывается в крупнозернистый мрамор. Образование мрамора в больших количествах и масштабах может возникнуть под действием высокого давления, если известняк оказался в этих условиях.

Образование кристаллов в природе не заканчивается кристаллизацией и перекристаллизацией, так как существует еще один сложный процесс – *метасоматоз*, когда одни кристаллы горной породы при приносе и выносе химических элементов замещаются другими химическими элементами, при этом растворение старых и образование новых кристаллов в породе происходит почти одновременно с сохранением их в твердом виде. В результате химический состав минералов изменяется.

Переход в кристаллическое состояние – это качественный скачок, который возможен при строго определенной температуре и давлении кристаллизации. Если управлять процессом кристаллизации, можно достигнуть изменения свойств многих материалов.

В промышленных методах кристаллизации чаще используют затравки из выращенного вещества или из изоморфных веществ, которым придают особую форму или определенную ориентировку для образования кристалла заданной формы.



## РАСТВОРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

В природных условиях кристаллы не только появляются на свет и растут, но и исчезают – растворяются, расплавляются и даже испаряются. Растворение (исчезновение) кристалла, подобно росту, – процесс постепенный.

*Растворимость* – способность вещества образовывать с другими веществами раствор. Растворимость численно определяется концентрацией насыщенного вещества при данных условиях раствора.

Наибольшую взаимную растворимость имеют вещества со сходным строением и свойствами (подобное растворяется в подобном).

С ростом температуры растворимость большинства жидкостей и твердых тел увеличивается. Растворимость газов повышается с давлением.

Примеры растворения многочисленны.

Как только раствор, в котором находится кристалл, по какой-либо причине становится ненасыщенным, обогащается химически активным реагентом или нагревается, сразу начинается растворение кристалла. Для минералов растворение – это один из этапов истории кристалла, воссоздающий окружающую его природную обстановку. Особенно ярко это проявляется в известняке, когда подземные воды, насыщенные углекислотой, вымывают большие полости – пещеры, размеры которых иногда исчисляются километрами. Такая вода способна хорошо растворять карбонат кальция, повышая его растворимость в несколько десятков раз, относительно той ничтожно малой величины (0,013 г/л), когда вода не была насыщена углекислотой. Как только избыток углекислоты улетучивается, растворимость карбоната кальция уменьшается и вновь начинается кристаллизация – образование сталагмитов, сталактитов – построек из кальцита.

Довольно хорошей растворимостью обладает гипс. В Пермской области имеется Кунгурская пещера, образовавшаяся в гипсе. Ее протяженность 45 км. При повышении температуры растворимость гипса растет до +24 °С, но с дальнейшим ее увеличением начинает падать. Однако стоит добавить хлорид натрия – растворимость увеличивается.

Минералы часто образуются в глубинных недрах Земли, где господствуют совсем другие условия – высокая температура и давление, а вода всегда содержит «сорастворяющие» химически активные примеси. И это резко увеличивает растворимость минералов.

В природных условиях кристаллы очень часто подвергаются частичному растворению, отчего форма их может сильно изменяться. Например, кристаллы

в ненасыщенном растворе растворяются, а в перенасыщенном растут.

У кристаллов-многогранников в ненасыщенном растворе или чистом растворителе растворение, как правило, начинается с выступающих частей – вершин и ребер. В результате вершины и ребра притупляются и закругляются, а грани превращаются в округлые кривогранные поверхности. Вследствие этого кристалл приобретает как бы оплавленную форму.

Это происходит оттого, что частицы, отделяющиеся при растворении краевых областей граней, имеют большую свободу движения, чем серединные частицы, легче отходят от кристалла и открывают растворению доступ к лежащим под ним слоям. Очень важными факторами при растворении являются температура и тип раствора.

По данным Б. Кантора (1985), если в 1 литре воды в комнатных условиях можно растворить не более 0,004 г кварца, то при 350 °С – уже 2,5 г, а в щелочных растворах даже до 70 г. Растворимость других минералов тоже имеет место, она увеличивается, особенно в экстремальных условиях недр Земли.

Растворимость кристаллических индивидов может увеличиваться из-за структурных дефектов и примесей. Мелкие зерна всегда растворяются лучше крупных кристаллов. За счет этой разницы минералы в благоприятных условиях могут перекристаллизовываться с укрупнением индивидов.

При растворении на гранях кристалла всегда образуются микроскопические многогранные углубления – так называемые *фигуры разъедания*, или, иначе, *фигуры растворения*, имеющие важное морфологическое значение. Они легче всего получаются при действии слабых растворителей и либо покрывают всю грань, придавая ее поверхности матовый вид, либо возникают в немногих отдельных центрах грани. В последнем случае они обычно крупнее и форма их видна более отчетливо.

Области минимальных скоростей растворения оказываются матовыми. При растворении кристалл покрывается теми гранями, которые имеют наибольшие скорости растворения.

## **ПОНЯТИЕ О КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВЕЩЕСТВЕ И КРИСТАЛЛАХ**

Кристаллические вещества имеют чрезвычайно широкое распространение. И этому они во многом обязаны своей устойчивостью на земной поверхности.

Что же определяет кристаллическое вещество?

Термин *кристаллический* относится к любому твердому телу – индивиду, обладающему упорядоченным внутренним строением и распределением составляющих его атомов или ионов (заряженных частиц), независимо от того, обладает оно правильной внешней формой или лишено ее. В этом состоит главная отличительная особенность кристаллического вещества от некристаллического (аморфного – бесформенного). Упорядоченность, определенная закономерностью внутреннего строения, характернейшая особенность кристаллического вещества и кристаллов. В настоящее время установлено, что подавляющее большинство окружающих нас твердых тел и предметов имеет кристаллическое строение, часто слишком сложное. К ним относятся минералы из класса «Силикаты», горные породы, металлы и сплавы, строительные материалы (цемент, кирпич), минеральные удобрения, стиральные порошки, многие лекарства, продукты питания (сахарный песок и поваренная соль) и многое другое.

Кристаллические твердые тела, лишенные правильной внешней формы, встречаются в природе на каждом шагу, в отличие от хорошо образованных кристаллов. Большая часть таких тел, как правило, представлена отдельными кристаллическими зернами, растущими в очень стесненных условиях, поэтому форма их неправильная, определяется взаимным влиянием этих зерен при одновременном росте (горные породы).

Но, независимо от внешней формы и способа образования, каждое отдельное зерно в такой массе (агрегате) имеет ту же внутреннюю структуру, что и остальные, и такие же физические свойства, что и ограненные кристаллы данного минерала, металла или другого вещества.

Аморфные тела природные (янтарь, смолы, опал) и искусственные (стекло, пластмассы) упорядоченным расположением атомов и ионов не обладают и в связи с этим лишены свойств, присущих кристаллическим телам.

**Кристаллы** – твердые тела, имеющие естественную форму правильных выпуклых многогранников (рис. 5). Кристаллы – это образования, обладающие атомно-решетчатым строением и рядом других свойств, отличающих кристаллические тела от некристаллических.

При рассмотрении хорошо образованных кристаллов первое, что бросается в глаза, это их геометрически правильные формы, напоминающие строгие математические фигуры – как выражение их закономерного внутреннего строения, т.е. упорядоченного расположения в них атомов, ионов или молекул. Поражают очень ровные, гладкие, как зеркало, блестящие поверхности – *грани*, а линии их пересечения образуют *прямолинейные ребра*, схождение нескольких ребер в

одной точке у кристаллов – *вершины*. Углы между гранями называются *гранными углами* (рис. 5, а, б). Это очень хорошо представлено на рисунках кристаллов каменной соли и магнетита, подобное характерно и для других кристаллов.

Начиная с XVII в. кристаллами стали называть все тела с природной многогранной формой. Позже количество граней, ребер и вершин в правильных формах многогранников стали определять по формуле Леонарда Эйлера: *сумма граней плюс сумма вершин равна сумме его ребер плюс два*:

$$\Sigma Г + \Sigma В = \Sigma Р + 2$$

Для каменной соли в виде куба соответственно будем иметь:

$$6 + 8 = 12 + 2 \text{ (рис. 5, а).}$$

Для магнетита в виде октаэдра по этой же формуле получим:

$$8 + 6 = 12 + 2 \text{ (рис. 5, б).}$$

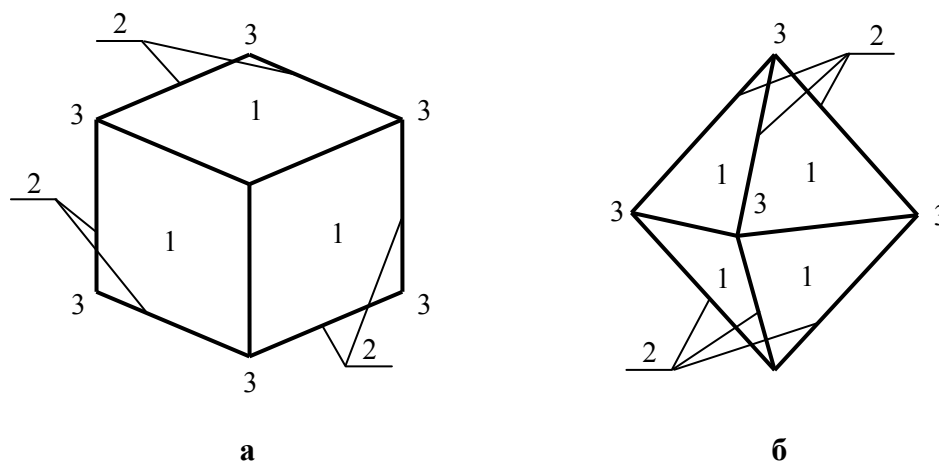


Рис. 5. Кристаллы: а – каменная соль; б – магнетит: 1– грани, 2 – ребра, 3 – вершины

Правильную многогранную форму кристалл может принимать в природе только при равномерном притоке из раствора или расплава вещества, отлагающегося на нем, и при отсутствии помех. Такими помехами могут служить, например, соседние кристаллы, которые будут мешать ему свободно развиваться, препятствовать его росту. При таких условиях даже кристаллы одного и того же вещества могут принимать самую разнообразную форму.

Но кристалл, выросший в любых неблагоприятных условиях и не имеющий правильной огранки или потерявший ее в результате той или иной обработки, сохраняет основной признак – кристаллическое строение и решетчатую атомную структуру. Это возможно из-за того, что форма реального кристалла опреде-

ляется внутренним фактором – кристаллической структурой и внешним – взаимодействием со средой обитания. Форма очень чувствительна к изменениям среды: температуре, давлению, концентрации кристаллизующего вещества, движений среды, темпа обновления, интенсивности и силы массопереноса. Кристаллическая структура, наоборот, сохраняется при широких изменениях условий кристаллизации. Это фактор стабильности, а внешний – влияние среды – фактор изменчивости (Кантор, 1985).

Все закономерности внутреннего строения, все характерные свойства кристаллического вещества лучше всего проявляются в его внешней правильной форме – кристаллах. Характеристику некоторых из них приводим по данным М.П. Шаскольской (1976), И.И. Шафрановского (1984) и др.

1. **Однородность** – свойство идеально образованных кристаллов (монокристаллов), в которых нет дефектов, они должны быть одинаковыми во всем своем объеме, в каждой его точке, у них не должно быть замутненных участков, трещиноватости, посторонних включений и т.д.

Только в условиях, приближающихся к идеальным, могут вырастать совершенные, без дефектов кристаллы. В природе такие условия исключительно редки, поэтому идеальные однородные кристаллы (монокристаллы) практически не встречаются и поэтому для технических целей их теперь вынуждены выращивать в специальных лабораториях и на заводах. Однородность, как характерное свойство природных кристаллов, некоторыми авторами в настоящее время не выделяется. Однако она характерна для искусственных кристаллов.

2. **Анизотропность** (неравносвойственность) – особенность однородного тела, обладающего одинаковыми свойствами по параллельным (и симметричным) направлениям, и неодинаковыми по непараллельным (и несимметричным) направлениям. С анизотропностью связано атомно-решетчатое кристаллическое строение и большое количество различных физических свойств. Остановимся на некоторых из них.

Все анизотропные кристаллы (кроме изотропных – равносвойственных, принадлежащих к кубической сингонии) имеют, например, различные коэффициенты теплового расширения по различным направлениям, различную теплопроводность и электропроводность, различную скорость света, различную диэлектрическую проницаемость и т.д.

Многие кристаллы обладают способностью кристаллизоваться противоположно двум концам (например, горный хрусталь – рис. 6) и анизотропны. Для минерала дистена характерна резко различная твердость: по удлинению низкая,

а перпендикулярно к нему очень высокая. Кристаллы слюды отличаются хорошо выраженной анизотропностью, она проявляется в легком расщеплении параллельно пластинчатости и не расщепляется по другим направлениям. Скорость роста кристаллов тоже является анизотропной. Если бы она была изотропной, то кристалл вырос бы в форме шара.

Анизотропность связана с тем, что вдоль непараллельных рядов кристаллической решетки расстояния между частицами в общем неодинаковы, из-за чего и свойства по таким направлениям различны. Вдоль параллельных рядов решетки частицы расположены строго одинаково, поэтому свойства кристалла по таким направлениям одинаковы (рис. 6).

Только приведенными выше примерами физические свойства анизотропных кристаллов не исчерпываются, у минералов они многочисленны.

3. **Способность самоограняться** – свойство кристаллического тела принимать геометрически правильную многогранную форму при определенных условиях.

Это свойство присуще только кристаллам, выросшим в идеальных условиях при свободном росте, определенных температурах и давлении, регулярном поступлении веществ. Любого исследователя кристаллических образований в первую очередь интересует свойство их самоограняемости.

Способность кристаллов самоограняться можно проследить на следующем примере – если взять частично поврежденный растворением кристалл или его осколок или выточить из кристалла шарик и поместить в соответствующий перенасыщенный раствор, он восстановит свою нормальную плоскогранную и прямореберную форму. Такое восстановление кристаллических многогранников называется **регенерацией** кристаллов. Свойство кристаллов самоограняться связано с их структурой: грани кристалла – это плоские сетки, а ребра – ряды решетки. Стекланный же шарик, пластмассы сами собой никогда не превратятся в многогранник.

Отдельные кристаллы, хорошо ограненные, могут достигать в природе гигантских размеров. Например, на о. Мадагаскар был найден кристалл берилла длиной 18 м и весом 380 т, в Казахстане – горный хрусталь до 7,5 м длины и весом 70 т, в Чили – гипс 8 м, в Норвегии – микроклин – 10 м, в США –

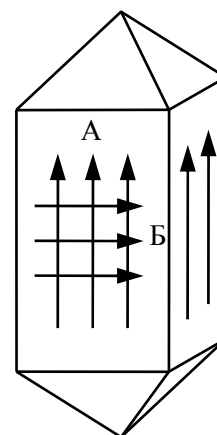


Рис. 6. Анизотропия в кристалле кварца (горного хрусталя). Между направлениями А и В свойства различны

флюорит – двухметровой длины и др. Но такие очень крупные ограненные кристаллы встречаются крайне редко. В других же случаях кристаллы не обнаруживаются невооруженным глазом, так как они очень малы и без оптических приборов (электронный микроскоп) их не увидишь. Поэтому может показаться, что кристаллические тела в природе встречаются редко. Но это совсем не так. Кристаллические образования повсеместно имеют широкое распространение. Так, например, с помощью микроскопа установлено, что многочисленные горные породы, слагающие земную кору, образованы зернистыми *кристаллическими агрегатами* (гранит, песок, мрамор и др.). Кристаллическими являются доломиты, известняки, каменная соль, гипс, без которых человек не может обойтись.

Металлы, сплавы, каменные строительные материалы являются также кристаллическими.

В наше время возможности распознавания и исследования кристаллических образований сильно возросли от использования новейших электронно-микроскопических, электронно-графических и др. методов.

Исследования свидетельствуют, что кристаллическое вещество и кристаллы распространены повсеместно, только правильная форма их в силу стесненных условий или других многочисленных природных причин в должной мере не реализована, но свойства их сохранились и поэтому имеют большое практическое значение. В современный период бурное развитие техники требует от науки все новых и новых высокосортных кристаллических образований с определенными заданными свойствами.

Познакомившись с основными особенностями зарождения, роста и разрушения, растворения кристаллов, понятием о кристаллическом веществе и кристаллах, перейдем к изучению внутреннего строения структуры кристаллов в прошлом и в настоящее время.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РЕШЕТКА И СТРУКТУРА КРИСТАЛЛОВ

В прошлом, когда внутреннее строение кристаллов было неизвестно, учеными было принято положение: *независимо от того, что представляют собой слагающие кристалл материальные частицы и какова их форма, возможно отобразить их с помощью пространственной решетки, представляющей трехмерное точечное построение.*

Ее можно представить следующим образом: мысленно заполним пространство множеством равных параллелепипедов, сложенных параллельно и заполняющих пространство без промежутков. Если внутри каждого элементарного параллелепипеда (рис. 8) выделить соответственные точки (например, их вершины или их центры тяжести), а параллелепипеды убрать – получим модель пространственной решетки (рис. 9, а).

**Пространственная решетка** – геометрическая схема внутреннего строения кристаллического вещества. Представляет собой бесконечную совокупность точек (узлов), расположенных по вершинам равных параллелепипедов, сложенных равными гранями без промежутков. Пространственную решетку можно построить не только беря вершины, но и любые соответствующие точки параллелепипедов.

Простейший пример такой решетки представляет кладка из одинаковых кубиков или кирпичиков, вплотную приложенных друг к другу.

Возьмем кладку из восьми кубиков (рис. 7, а) – центры их будут являться вершинами **кубической элементарной ячейки** (рис. 7, б). Если приложим к взятым восьми кубикам спереди, сзади, по бокам, сверху и снизу такие же кубики и выделим их центры, получим **пространственную решетку**, состоящую из кубических (гексаэдрических) ячеек.

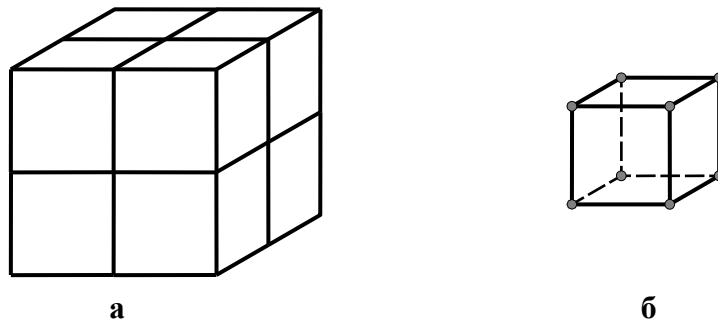


Рис. 7: а – восемь кубиков, заполнивших пространство без промежутков; б – простая (гексаэдрическая) ячейка



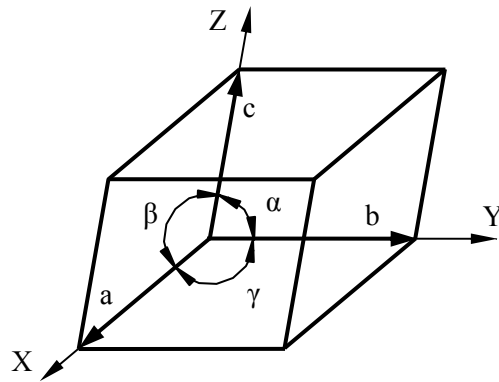


Рис. 8. Элементарный параллелепипед:

$a, b, c$  – промежутки рядов или элементарные трансляции соответственно по осям  $X, Y, Z$ ,  
 $\alpha$  – угол, лежащий против оси  $X$ ,  $\beta$  – против оси  $Y$ ,  $\gamma$  – против оси  $Z$

В решетке (рис. 9, а) можно выделить следующие основные элементы:

1. Частицы в решетке располагаются на одинаковых параллельных рядах, которые надо представлять бесконечными (рис. 9, а, б).

2. Одинаковые частицы, связанные между собой одинаковыми промежутками (трансляциями) бесконечного ряда, называются узлами ряда (рис. 9, б).

3. Расстояние между частицами (узлами) составляет несколько нанометров ( $H_m = 10^{-9}$  м), поэтому даже на 1 см длины решетки могут располагаться до 100 миллионов частиц. Эти расстояния для каждого данного направления выдерживаются с замечательным постоянством (рис. 9, а, б).

4. Кратчайшее расстояние между частицами в ряду – есть параметр ряда, или промежутков, или перенос (трансляция). Эту характеристику ряда на схеме обозначают, например,  $a$  или  $b$  (рис. 9, в), или  $c$ , когда имеется три непараллельных ряда (рис. 9, а).

5. С помощью двух непараллельных промежутков (трансляций)  $a$  и  $b$ , повторяя одинаковые точки, можно получить двухмерную плоскую сетку (рис. 9, в), а с помощью трех произвольных узлов, не лежащих на одной прямой, – параллелепипед (рис. 8).

6. Параллелепипед, построенный на трех элементарных трансляциях  $a, b, c$ , называется *элементарным параллелепипедом*, или *элементарной ячейкой* (рис. 8). Из совокупности плоских сеток и параллелепипедов образуется пространственная решетка (рис. 9, а).

Из переноса пространственной решетки на кристалл заключаем, что грани его соответствуют плоским сеткам, ребра – рядам, а вершины – узлам решетки.

Решетчатое строение характерно для всех кристаллических образований. Для построения решетки используют три осевых отрезка  $a, b, c$  и три угла  $\alpha, \beta, \gamma$  (рис. 8).

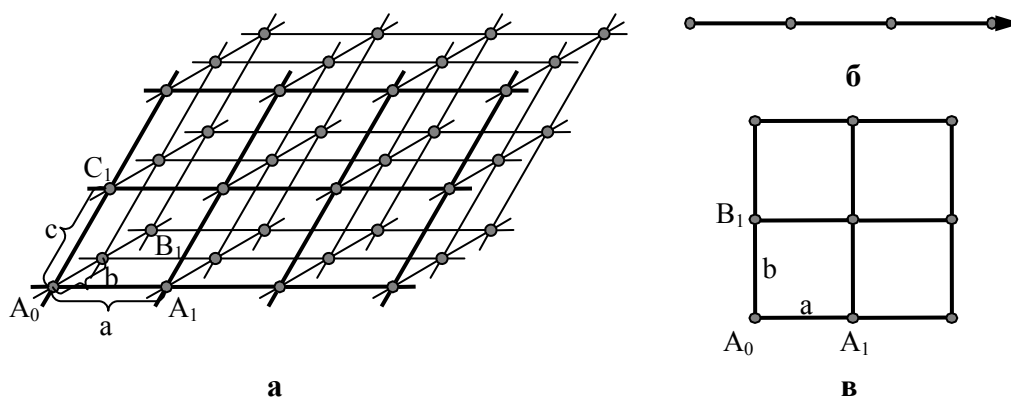


Рис. 9: а – пространственная решетка, б – ряд и узлы решетки, в – плоская сетка решетки, называют иногда петли

Для характеристики формы параллелепипеда достаточно пяти величин: два отношения  $a : b$  и  $b : c$  ( $a : b : c$ ) и три угла между ребрами  $\alpha, \beta, \gamma$ .

Теория решетчатого строения кристаллов была создана задолго до рентгеноструктурного анализа, выдающиеся кристаллографы прошлого уже дали строгую математическую разработку этой теории. Великий русский кристаллограф Е.С. Федоров (1853–1919) вывел в 1890 г. 230 законов расположения элементарных частиц внутри кристаллических структур.

В 1912 году немецкий физик М. Лауэ с помощью дифракции рентгеновских лучей экспериментально подтвердил правильность созданных ранее теоретических построений.

С этого периода многогранная форма кристалла стала характеризоваться его внутренним строением – кристаллической структурой.

**Кристаллической структурой** называют только такую, которая состоит исключительно из атомов, ионов, молекул.

После 1912 года **пространственные решетки** стали называть **кристаллическими решетками**, если они отражают определенный способ распределения атомов, ионов кристаллической структуры.

В зависимости от природы элементарных частиц, образующих кристаллическую решетку, различают следующие ее виды:

1. **Ионная кристаллическая решетка** (характерна для силикатов, галоидов, щелочных металлов).

2. **Атомная кристаллическая решетка** (связь атомов ковалентная, самая прочная – алмаз).

3. **Молекулярная кристаллическая решетка** (состоит из нейтральных молекул вещества, связь между молекулами обеспечивается силами молекулярного взаимодействия).

Заметим, что в природе встречаются кристаллы, в которых могут сочетаться различные типы кристаллических решеток. В кристалле связи частиц в одном направлении являются ионными, а в противоположных – молекулярными и т.п.

## **ЗАКОН ПОСТОЯНСТВА УГЛОВ КРИСТАЛЛОВ – ПЕРВЫЙ ЗАКОН КРИСТАЛЛОГРАФИИ**

При равномерном притоке растворенного вещества к растущему без помех кристаллу последний формируется в виде правильного многогранника. Неравномерный же приток вызывает искажение правильной формы. В природных условиях чаще наблюдается неравномерный приток вещества к растущему кристаллу, поэтому равные по своему строению грани развиваются неодинаково. Это затрудняет изучение закономерностей, проявляющихся во внешней форме кристаллических многогранников. Например, кристаллы кварца могут иметь до восьми различных форм.

Но исследователи кристаллов всякий раз убеждаются, что у одного и того же минерала встречаются самые разнообразные формы и размеры кристаллов, а двугранные углы между соответственными гранями неизменны. С чем это связано? За многовековую историю изучения кристаллов учеными установлено, что при росте одной или нескольких граней кристалла новыми слоями углы между гранями не изменяются, остаются постоянными, как бы ни изменялась форма кристалла одного и того же вещества, одинакового по структуре и составу. Это связано с постоянством углов между соответственными гранями. В процессе роста меняются площади граней (грани нарастают параллельно самим себе), их форма, какие-то грани могут вытесняться соседними и зарастать, у одних они хорошо выражены, у других плохо, но взаимный наклон граней остается неизменным, поэтому углы между гранями тоже остаются постоянными.

Рассматривая на рис. 10 первые два кристалла, выросшие при равномерном питании веществом в свободных условиях, без помех, видим, что они обладают четкими, одинаковыми гранями, что и обусловило кристаллам свойственную им правильную, красивую многогранную форму (рис. 10, а). Вторые два кристалла, выросшие при неравномерном притоке вещества к граням, были стеснены присутствием соседних кристаллов, отсутствием достаточного свободного пространства; правильной, хорошей формы не дали (рис. 10, б).

Следует отметить, что правильные, равномерно образованные кристаллы в природе встречаются крайне редко.

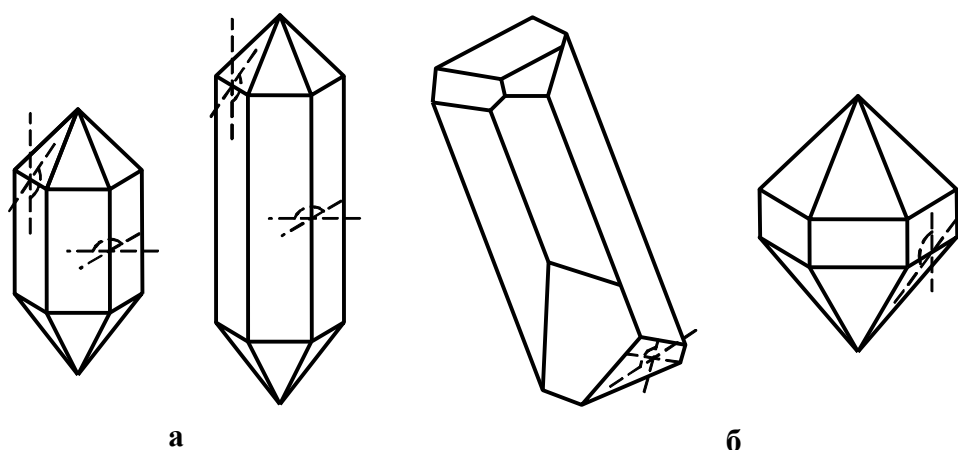


Рис. 10. Постоянство двугранных углов кристаллов кварца при различном размере (а) и форме (б) (по Ларионову и Ананьеву, 1969)

Но, так как они одинакового состава, структуры, углы между соответственными гранями у них одинаковые (рис. 10 а, б).

На это замечательное свойство кристаллического вещества в 1669 году первым обратил внимание датский ученый Н. Стенон (1638–1686).

Основной заслугой Стенона считается открытие *первого закона кристаллографии – закона постоянства углов*. Правда, он был показан на двух частных примерах (кристаллах горного хрусталя  $\text{SiO}_2$  и гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) не в самом тексте труда, а в комментариях к рисункам. Ученый взял несколько кристалликов кварца из различных месторождений и обрисовал на бумаге контуры одной из одинаковых граней в каждом кристалле. Рисунки получились большей частью кособокие, потому что кристаллы были неидеально правильные. Однако углы между соответствующими гранями оказались одинаковыми. Так, Стенон открыл закон постоянства углов кристаллов, но никто из его современников не обратил внимания на это замечательное открытие, и закон скоро был забыт.

В истории науки известно немало случаев, когда один и тот же закон оказывался открытым разными исследователями, независимо друг от друга.

Закон постоянства углов позднее открывали другие исследователи (Х. Гюйгенс – для кальцита, А. Левенгук – для гипса, М. Ломоносов – для кристаллов селитры в 1749 году). В последнем случае указанную дату можно смело считать датой зарождения русской научной кристаллографии.

Столетие спустя после исследований Н. Стенона закон постоянства углов на кристаллах снова привлек внимание ученых. В 1783 г. его заново представляет французский кристаллограф Жан-Батист Роме Делиль (1736–1790) после двадцатилетней работы по измерению двугранных углов на 500 кристаллах, описанных в его кристаллографии.

Роме Делиль так сформулировал окончательно этот закон: *границы кристалла могут изменяться по своей форме и относительным размерам, но углы между соответственными гранями во всех данного рода кристаллах постоянны и неизменны.*

Однако надо помнить, что это справедливо для кристаллов одного и того же вещества, одной модификации, образовавшихся при одних и тех же условиях (Т и Р).

Ввиду особой важности этого закона его стали именовать *первым основным законом кристаллографии*. Вплоть до XX в. кристаллография развивалась преимущественно на этом законе.

Данный закон сыграл огромную роль для точной диагностики любых кристаллов посредством измерения двугранных углов. Величины углов между соответствующими гранями – это характерное свойство каждого кристаллического вещества.

Характеристика способов замеров и используемых приборов приводится по И. Шафрановскому, В. Алявдину (1984).

Первоначально эти измерения проводились простейшим прибором – прикладным гониометром (угломером) – рис. 11, состоящим из транспортира с вращающейся линейкой. Отсчеты берут с помощью края линейки АВ с левой стороны по транспортиру. Точность небольшая, всего 1–2°, сейчас он используется при измерении углов на крупных кристаллах.

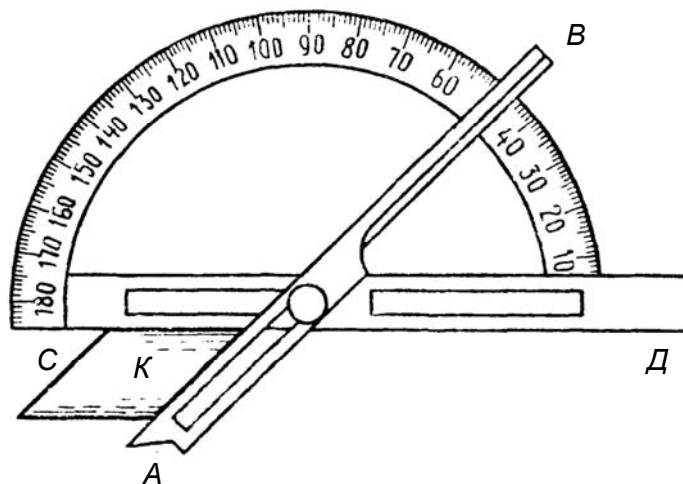


Рис. 11. Прикладной гониометр: *CD* – основание транспортира; *AB* – вращающаяся линейка для отсчета углов; *K* – кристалл

Позже был изготовлен однокружной гониометр, вытеснивший прикладной гониометр, точность которого была несколько минут, затем однокружной гониометр сменился более точным теодолитным двукружным гониометром (рис. 12).

Изготовление первых теодолитных двукружных гониометров в 1838–1839 гг. организовал величайший кристаллограф Е.С. Федоров в мастерских Московского геологоразведочного института (МГРИ), точность прибора – 1 минута.

Двукружный отражательный гониометр, называемый часто федоровским теодолитным гониометром (рис. 12), состоит из двух градуированных лимбов: вертикального *B*, вращающегося вокруг горизонтальной оси, и горизонтального *Г*, вращающегося вокруг вертикальной оси. У лимбов имеются нониусы. Точность измерения углов до 1 минуты и менее.

Кристалл *K* для измерения прикрепляют пластилином к стерженьку – кристаллоносцу, закрепленному на особой подставке, расположенной в середине вертикального круга. Центр кристалла должен совпадать с точкой пересечения осей вращения обоих кругов. Исследуемый кристалл вращают вокруг этих осей и освещают источником света со стороны. Задача исследователя – уловить отраженные с помощью зрительной трубы *З* лучи от той или иной грани кристалла и взять по нониусам отсчеты. В результате получают две угловые величины, так называемые сферические координаты. Кристалл считается измеренным, если для каждой его грани определены соответственные сферические координаты. По найденным угловым величинам с помощью специальных таблиц и определителей Е.С. Федорова, А.К. Болдырева и других устанавливают вещество измеренного кристалла.

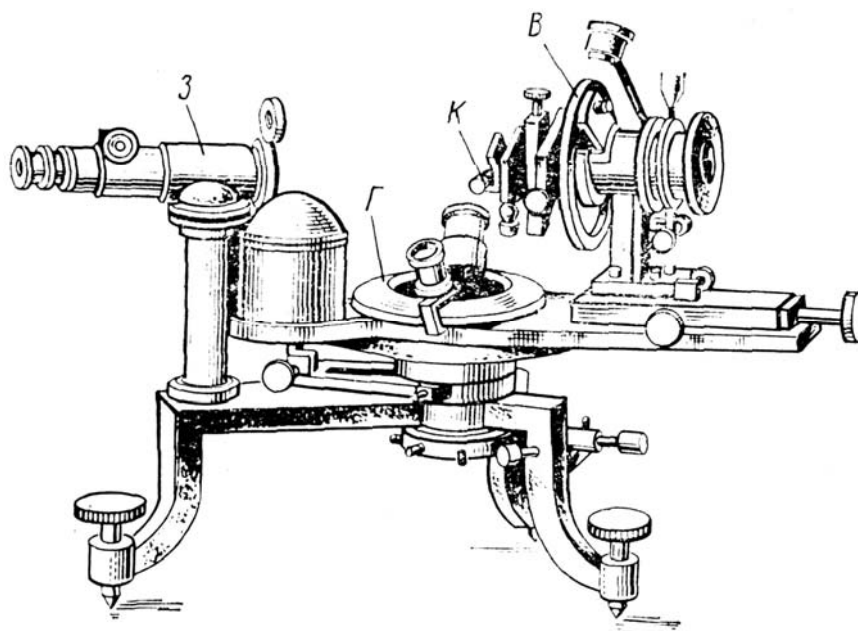


Рис. 12. Двукружный отражательный гониометр Е.С. Федорова:  
*З* – зрительная труба; *Г* – горизонтальный лимб; *В* – вертикальный лимб;  
*К* – кристаллоносец (место для установки и крепления кристалла)

Гониометрия реальных кристаллов стала фактической основой для развития математической кристаллографии.

Несмотря на то, что в 1912 году была открыта дифракция рентгеновских лучей и разработан рентгеноструктурный анализ кристаллов, гониометрический метод существует до сих пор для диагностики кристаллов.

**Преимущество** гониометрического метода:

1. Кристаллы, взятые для анализа, сохраняются и после исследования.
2. Можно брать маленькие (даже с булавочную головку), хорошо образованные кристаллики.
3. Скорость определения не зависит от сложности состава образца, причем время исследования не превышает 2–3 часов.

**Недостатки:**

1. Определение возможно только при наличии хорошо образованных кристаллов.
2. Разные вещества с равными углами между гранями одинаковых форм гониометрически неотличимы.
3. Исследования могут быть произведены лишь для веществ, перечень которых помещен в специальных таблицах (составленных Е.С. Федоровым, а затем переработанных А.К. Болдыревым).

## СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ

Симметричные предметы встречаются всюду: в природе и быту. В минералогических музеях мы долго не отрываем глаз от красивых, правильной формы кристаллов, бережно расставленных на полках витрин.

Симметрия используется в математике (свойства геометрических фигур), архитектуре, являясь неперенным качеством, если не всего сооружения в целом, то его частей и деталей – плана, фасада, колонн. Симметрия свойственна искусству (гармоничная композиция); декоративно-прикладному искусству (служит в качестве основного приема построения бордюров и орнаментов), проявляется в химии (геометрические конфигурации молекул), физике (физические законы симметричны), биологии (биосимметрия) и мн. др. Но нигде симметрия не проявлена в таком большом разнообразии и так широко, как в кристаллах минералов. Это объясняется тем, что симметрия – специфическая закономерность кристаллов, многократно в них повторяется. Симметрия – хорошая основа для диагностики, систематики и классификации кристаллов. Большую роль для разработки симметрии кристаллов сыграли блестящие достижения кристаллографов, среди которых фамилия русского академика Е.С. Федорова.

**Симметрия** (от греч. «συμμετρία» – «равновеликость, соразмерность, закономерность») – это своеобразная, закономерная повторяемость в расположении равных фигур или равных частей одной и той же фигуры на плоскости или в пространстве.

В приложении к кристаллографии **симметрия** – закономерность, наблюдаемая в расположении граней, ребер и вершин кристалла, благодаря чему в нем присутствуют несколько равных частей.

Далее И. Шафрановский (1984) поясняет данное выше определение симметрии о равенстве фигур: две фигуры называются **равными**, если расстояние между двумя любыми точками одной фигуры равно расстоянию между двумя соответственными точками другой. Это приложимо и к равным частям одной и той же фигуры, и к таким фигурам, которые при наложении одной на другую совпадают всеми своими точками (совместимо равные фигуры или взаимно симметричные). И, наконец, такие фигуры, которые относятся друг к другу как предмет и его зеркальное отражение (зеркально равные фигуры). Для примера совместимого равенства могут служить две одинаковые правые (или две левые)



перчатки. Образцом зеркального равенства являются две парные перчатки – правая и левая (рис. 13). Для проверки зеркального равенства поставим на ребро небольшое зеркальце между этими перчатками и убедимся, что они зеркально равны.



Рис. 13. Правая и левая перчатки зеркально равны

Операции, при помощи которых две симметричные фигуры могут быть совмещены друг с другом или самосимметричная фигура может быть совмещена сама с собой, называются **симметрическими преобразованиями**.

Для выявления закономерной повторяемости равных частей плоских или объемных кристаллов используют вспомогательные геометрические образы – **элементы симметрии**. К важнейшим из них относятся: **простые оси симметрии, плоскости симметрии, центр симметрии**.

Другие элементы симметрии, например сложные (инверсионные) оси симметрии, в данном пособии не рассматриваются – интересующиеся ими могут обратиться к полным курсам кристаллографии.

Оси, плоскости и центр симметрии присутствуют в кристаллах по отдельности или в определенных сочетаниях и необходимы при описании кристаллов. Заметим, что ни оси, ни плоскости и ни центр симметрии физически в кристаллах не существуют, все они специально воображаемые, чтобы охарактеризовать свойства симметричности, которыми обладает тот или иной кристалл. Элементы симметрии – ось, плоскость и центр – находятся во взаимной связи, и сочетания их ограничены.

**Ось симметрии (L)** – воображаемая прямая линия, при повороте вокруг которой на определенный угол кристалл два или более раз за один полный оборот ( $360^\circ$ ) совмещается со своим первоначальным положением, называется простой или поворотной осью симметрии.

Количество этих совмещений называется **порядком оси симметрии**, или **значимостью оси**. Совмещение обычно происходит при повороте кристалла на

углы в  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$ . Угол в  $60^\circ$  является элементарным для данной оси симметрии. Совмещение может происходить при повороте кристалла на углы  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$ . Угол  $90^\circ$  является элементарным для этой оси симметрии. Наименование или порядок оси  $n$  определяется по тому углу, на который надо повернуть кристалл для получения первого совмещения ( $\alpha$ ):

$$n = \frac{360^\circ}{\alpha}$$

В кристаллах  $\alpha$  может быть равен только  $360^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ . Таким образом различают оси 1, 2, 3, 4 и 6 порядков, при повороте вокруг которых кристалл совмещается сам с собой (приходит к самосовмещению). Порядки осей симметрии могут быть только целыми числами.

Ось симметрии на чертежах изображают прямой линией и обозначают латинской буквой  $L$ , а ее порядок – маленькой соответствующей цифрой (индексом), стоящей внизу справа после этой буквы (например,  $L_6$ ,  $L_4$  и т.д. – рис. 14), и читают: одна ось симметрии шестого порядка, одна ось четвертого порядка и т.д. Если в кристалле несколько одинаковых осей, то их количество ставится цифрой перед буквой  $L$ , например  $3L_4$ ,  $4L_3$ , и читается: три оси четвертого порядка, четыре оси третьего порядка и т.д.

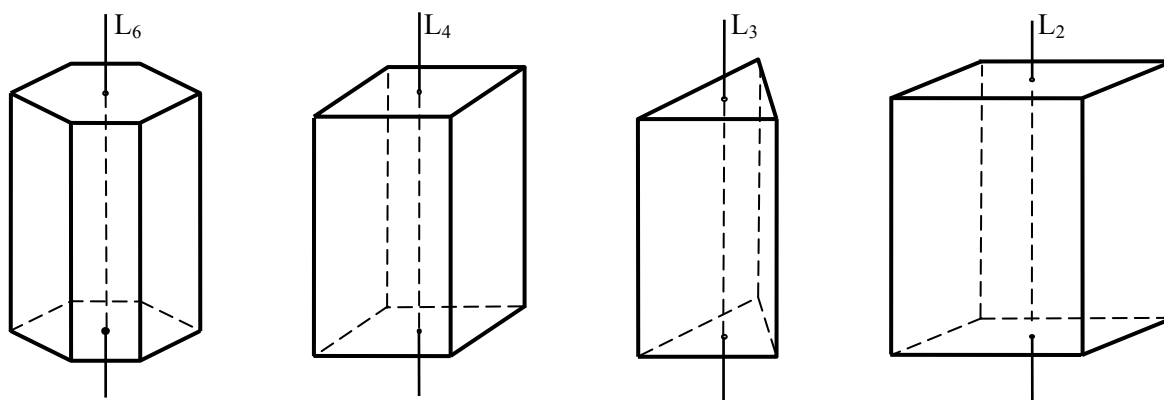


Рис. 14. Оси симметрии шестого, четвертого, третьего и второго порядков, соответственно в гексагональной, тетрагональной, тригональной, ромбической призмах

В отличие от других симметричных предметов кристаллические многогранники могут иметь оси только  $L_6$ ,  $L_4$ ,  $L_3$ ,  $L_2$  порядков. Это связано с упорядоченностью их внутреннего строения. Формально можно считать, что в кристаллах есть ось первого порядка  $L_1$ , но даже любая несимметричная фигура при повороте на  $360^\circ$  совместится сама с собой, поэтому эта ось не используется.

В кристаллах может быть одна или несколько осей симметрии одинакового или разных порядков, а может не быть ни одной.

В кристалле в форме куба имеется три оси четвертого порядка ( $3L_4$ ), проходящих через центры противоположных граней (рис. 15, а), четыре оси третьего порядка ( $4L_3$ ), каждая из которых проходит через две противоположные вершины, совпадая с одной из пространственных диагоналей куба (рис. 15, б), шесть осей второго порядка ( $6L_2$ ), проходящих через середины противоположных ребер (рис. 15, в), т.е. в кубе выявляется  $3L_44L_36L_2$  (рис. 15). Имеются в кубе девять плоскостей ( $9P$ ) и центр симметрии (рассмотрим позже).

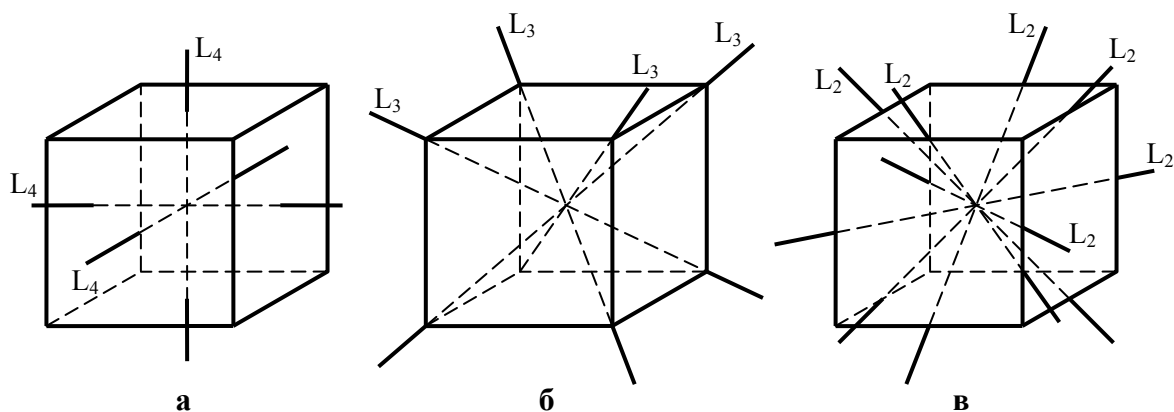


Рис. 15. Оси симметрии куба: а –  $3L_4$ , б –  $4L_3$ , в –  $6L_2$ .

В кристаллах, как оказалось, нет осей пятого порядка и осей симметрии порядка выше шести. При попытке заполнить пространство пяти- либо семигранными призмами обязательно останутся пустоты, и для кристаллов такие формы не подходят.

В настоящее время тротуары мостят плиткой в виде ромбиков, прямоугольников, треугольников, квадратов и шестигранников. Из рисунка видно, что эти формы, имея оси симметрии  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  и  $L_6$ , заполняют пространство симметрично и непрерывно (рис. 16, а, б).

А плитками пяти-, семи- и восьмигранными с аналогичными им осями  $L_5$ ,  $L_7$ ,  $L_8$  полностью заполнить поверхность не удастся – остаются пустоты (рис. 16, в, г), показанные черным цветом. В последнем рисунке ось  $L_8$  понизилась до  $L_4$  (черные квадратики), значит у восьмиугольника нет оси  $L_8$ , а есть только ось  $L_4$ , нет осей симметрии у пятигранных и семигранных плиток.

В геометрии, наоборот, возможны оси любых целых порядков. Через центр правильного треугольника перпендикулярно плоскости чертежа проходит  $L_3$ , квадрата –  $L_4$ , правильного пятиугольника –  $L_5$ , правильного шестиугольника –  $L_6$ , так вплоть до круга, через центр которого проходит ось бесконечного порядка ( $L_\infty$ ). Оси конуса или цилиндра тоже являются осями симметрии бесконечного порядка, а в шаре любой его диаметр является  $L_\infty$ . Поэтому он обладает бесконечным

количеством осей ( $\infty L_{\infty}$ ) бесконечного порядка. У пятиконечной морской звезды есть ось 5-го порядка, у ромашки или подсолнуха есть оси симметрии  $n$ -го порядка, шиповнику присуща  $L_5$ .

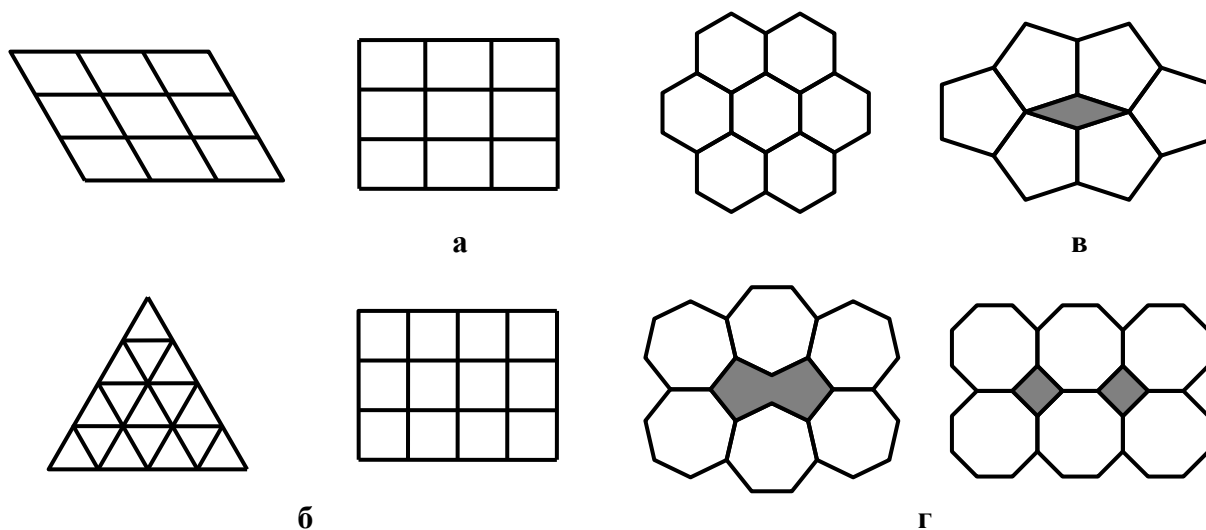


Рис. 16. Плоские сетки, составленные из многогранных плиток.  
Оси симметрии от оси  $L_1$  до оси  $L_8$  порядков (по Шаскольской, 1976)

**Плоскость симметрии (P)** – воображаемая плоскость, делящая кристалл на две зеркально равные части – одна часть как бы является зеркальным отражением другой. Зеркально равны правая и левая руки. Сложим их ладонями: разделяющая ладони воображаемая плоскость – это плоскость симметрии P (рис. 17, а).

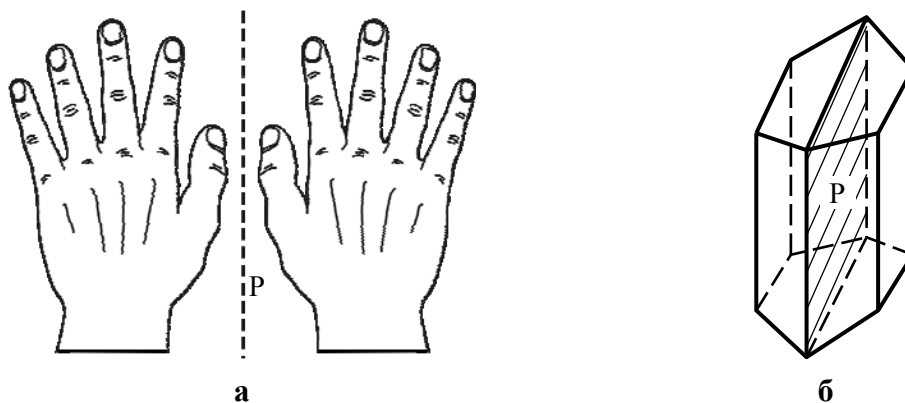


Рис. 17: а – плоскость симметрии; б – кристалл гипса

На кристаллах с плоскостью симметрии обязательно найдется хотя бы пара граней, связанных между собой как предмет и его зеркальное отражение – кристалл гипса (рис. 17, б).

Плоскость симметрии обозначают буквой P (или  $m$  – международный символ; здесь не рассматривается, можно ознакомиться в полных кристалло-

графиях), а количество плоскостей симметрии в кристалле ставится перед буквой  $P$ . В кристалле в виде куба девять плоскостей –  $9P$  (рис. 18), из них три плоскости симметрии взаимно перпендикулярные (рис. 18, а), они делят пополам противоположные ребра куба и являются *плоскостями прямоугольной системы координат*, шесть плоскостей – *диагональными* (рис. 18, б, в, г).

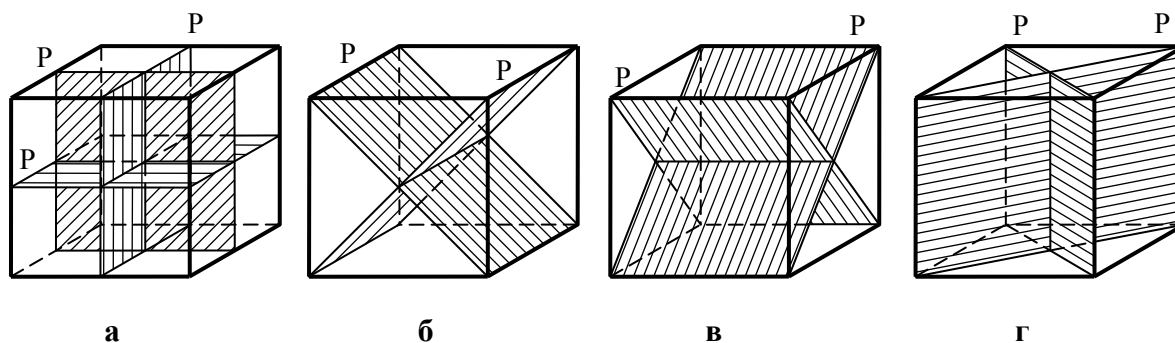


Рис. 18. Плоскости куба: а – координатные (3), б, в, г – диагональные (6)

В кристаллах может быть следующее количество плоскостей:  $P = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9$ . Количество их ставится перед символом в виде коэффициента:

1. Моноэдр (одногранник) –  $P$  (единица у моноэдра не ставится).
2. Ромбическая пирамида –  $2P$ .
3. Тригональная пирамида –  $3P$ .
4. Тетрагональная пирамида –  $4P$ .
5. Тетрагональная дипирамида –  $5P$  (4 вертикальных и одна горизонтальная).
6. Гексагональная пирамида –  $6P$ .
7. Гексагональная дипирамида –  $7P$  (6 вертикальных и одна горизонтальная).
8. Куб (гексаэдр) –  $9P$  (рис. 18, а, б, в, г).

Как видим, в кристаллах не бывает восемь плоскостей и более девяти. В каждом конкретном случае количество плоскостей указано в формулах симметрии кристаллов (табл. 1).

В геометрии возможны плоскости любых целых порядков. Рассмотрим равнобедренный треугольник (рис. 19, а). Три его биссектрисы представляют след трех плоскостей симметрии, перпендикулярных плоскости чертежа. В результате видно, что в каждом случае обе половины треугольника зеркально равны. В квадрате можем найти уже 4 плоскости симметрии ( $4P$ ). Следы двух из них совпадут с диагоналями квадрата, а следы двух других плоскостей параллельны сторонам квадрата и проходят через середины его сторон (рис. 19, б).

В прямоугольнике только две плоскости симметрии ( $2P$ ), следы их параллельны сторонам прямоугольника и проходят через их середины (рис. 19, в).

Но вдоль диагоналей прямоугольника плоскости симметрии провести нельзя, два его треугольника, хотя и равны, но не обладают зеркальным равенством. Плоскости симметрии располагаются в симметричной фигуре строго определенно, и все пересекаются друг с другом (рис. 18, 19).

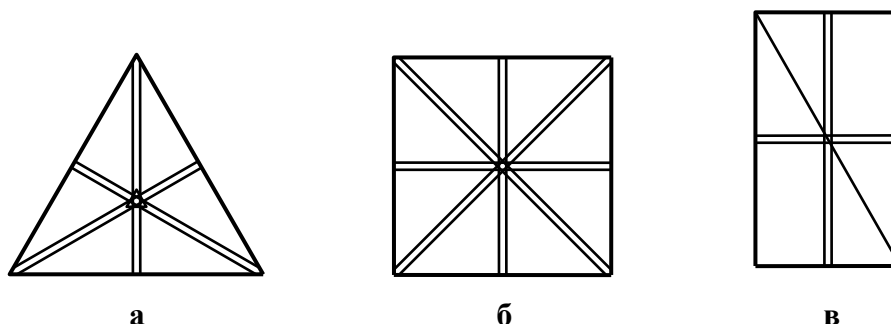


Рис. 19. Следы плоскостей симметрии в фигурах:  
а – равнобедренный треугольник, б – квадрат, в – прямоугольник

Все вышеуказанное можно проверить с помощью зеркала. В каждом случае поставив его вертикально на след плоскости, увидим, что правая половина займет положение левой, а затем повернуть зеркальце на другую сторону – левая переместится на место правой. Для этих целей лучше использовать двустороннее зеркальце.

В данных фигурах по этим направлениям пройдут и оси третьего, четвертого и второго порядков ( $L_3$ ,  $L_4$  и  $L_2$ ) соответственно.

**Центром симметрии (С)** – является особая точка внутри кристалла, делящая пополам любую проведенную через нее прямую линию, концы которой по обе стороны от нее на равных расстояниях ограничиваются одинаковыми парными точками, парными гранями или парными ребрами кристалла. В «центросимметричном» кристалле все точки (в частности, вершины) соответственно парные, а все прямые, соединяющие парные точки, пересекаются в центре симметрии. Из парных точек складываются парные ребра и парные грани; в центросимметричном кристалле они всегда перевернуты друг относительно друга (но не обязательно должны отличаться друг от друга).

На чертежах кристаллов центр симметрии отмечают точкой и обозначают буквой С. Когда в кристалле есть центр, тогда каждой его детали – грани, вершине, ребру – обязательно будет соответствовать парная деталь в виде аналогичной грани, вершины, ребра, лежащих по другую сторону от центра (С). Форма кристалла на рис. 20 подтверждает эти необходимые условия.

Центр симметрии имеется в кубе, октаэдре и во многих других многогранниках гораздо менее симметричной формы (рис. 21, б). В других

кристаллах его может не быть (рис. 21, а). Внимательное изучение горного хрусталя показывает, что в нем центра симметрии нет, так как головки кристалла ограничены нецентросимметричными гранями. Есть и другие формы, кроме горного хрусталя, в которых центра симметрии нет (например, гексагональная пирамида – рис. 21, в). Но любая прямая, проведенная через центр симметрии куба, встретит одинаковые части на равном расстоянии от центра, подобно форме на рис. 20.

Существует важное правило, которое полезно запомнить: **в многограннике, обладающем центром симметрии, каждой грани отвечает другая грань, равная и параллельная первой**. Убедиться в параллельности двух граней просто: положив многогранник на стол испытываемой гранью, обнаружим наверху вторую грань, параллельную плоскости стола, а следовательно параллельную и первой грани, совмещенной с плоскостью стола. Для окончательного решения о наличии центра в многограннике надо подобным образом подвергать анализу все грани многогранника.

Если хотя бы для одной грани не найдено парной ей параллельной грани – центр симметрии отсутствует (рис. 21, а). При проверке помимо параллельности пар необходимо устанавливать равенство этих пар, как этого требует наличие центра симметрии С (рис. 21, б).

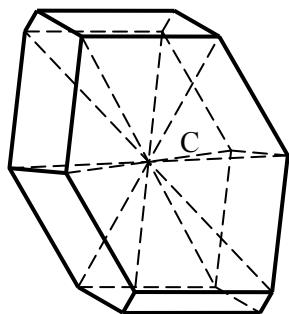


Рис. 20. Расположение центра симметрии С

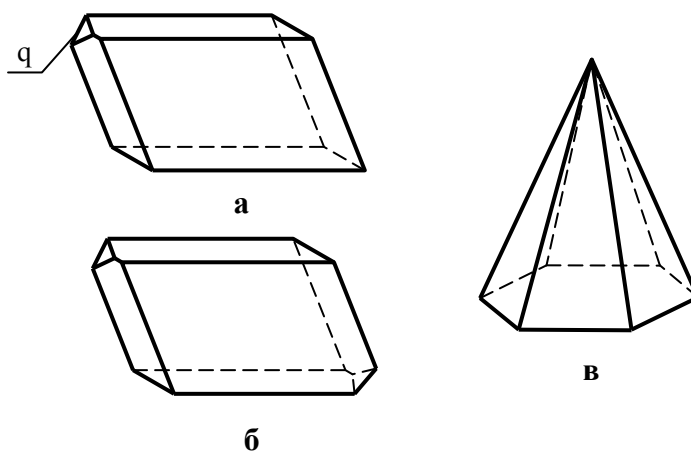


Рис. 21. Многогранники: а – без центра симметрии (грань q не имеет соответственно параллельной и равной грани); б – с центром симметрии (все грани попарно параллельны и равны), в – шестигранная (гексагональная) пирамида (центра симметрии нет)

Куб и модель в форме кирпичика (или спичечной коробки) представляют собой простейшие примеры многогранников с центром симметрии.

При описании кристаллов элементы симметрии записываются в виде формулы. При полном перечне элементов симметрии учитываются: оси

симметрии, плоскости симметрии и центр симметрии. Приведем порядок записи этих элементов симметрии, принятый в кристаллографии, при составлении формул кристаллов. На первое место в формуле кристалла ставят значение осей, начиная с максимальных ( $L_6, L_4, L_3, L_2$ ), на второе – плоскости симметрии  $P$  и на третье – центр симметрии  $C$ . Так, кристалл куба относится к планаксиальному виду симметрии, имеет формулу  $3L_44L_36L_29PC$  – это полный перечень элементов симметрии. Для других форм куба, их еще 4, отражен в формулах другой состав элементов симметрии (табл. 1).

## **КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ, СИНГОНИИ И ВИДЫ СИММЕТРИИ**

После того, как все возможные элементы симметрии у имеющегося кристалла определены, можно узнать, где он находится в классификации кристаллов, к какой относится категории, сингонии (системе), виду (классу), а также формулу из элементов симметрии (табл. 1).

Но прежде следует определить у них единичное направление.

Единственное, не повторяющееся в многограннике направление называется *особым*, или *единичным*, или *главным*. Оно необходимо при установке кристаллов в прямоугольной или косоугольной системе координат. Причем это направление, если оно есть в кристалле, всегда совмещают с вертикальной осью  $Z$ .

Единичным направлением является ось шестого порядка  $L_6$  в шестигранной призме или пирамиде, ось четвертого порядка  $L_4$  в четырехгранной призме или пирамиде. Но такая же ось  $L_4$  в кубе или октаэдре – уже не единичная. Таких осей в них три, и каждая из них может совместиться с другой такой же осью. Таким образом, в кубе и октаэдре нет единичных направлений.

По симметрии и по числу единичных направлений кристаллы делят на категории. Их три: *низшая*, *средняя* и *высшая*. *К низшей категории* отнесены *триклинная*, *моноклинная* и *ромбическая* сингонии. *Тригональная*, *тетрагональная*, *гексагональная* принадлежат *средней категории*. *К высшей категории* относится только одна *кубическая сингония*.

По формам примитивных (элементарных) ячеек в категориях выделяют семь сингоний. *Сингония* (от греч. «συν» – «вместе» и «γωνία» – «угол», т.е. сходноугольность) – это совокупность видов, характеризующихся одинаковой симметрией.



В каждой сингонии выделяются виды (классы) симметрии. В 1867 году А.В. Гадолин строго математически вывел 32 вида симметрии, полностью характеризующих все возможные для кристаллов комбинации известных элементов симметрии.

Систематически сгруппировав, И.И. Шафрановский, В.Ф. Алявдин (1984) составили таблицу *конечной кристаллографической симметрии* (табл. 1), где все 32 вида симметрии кристаллов распределили по категориям и сингониям, совпадающим с горизонтальными строчками, подчеркнув при этом важность видов симметрии.

Остановимся кратко на характеристике категорий, сингоний и важнейших видов симметрии.

### I. *Низшая категория*

У кристаллов низшей категории нет ни плоскостей (ни осей) симметрии. А если есть оси, то только второго порядка  $L_2$ , а единичных направлений несколько. Кристаллы уплощенного и асимметричного облика, причем ярко выраженного.

Как уже было указано, в низшей категории выделяется три сингонии: триклинная, моноклинная, ромбическая, в которых вместе имеется семь видов (классов) симметрии (табл. 1).

1. **Триклинная сингония** (от греч. «τρι» – «три» и «κλινω» – «наклоняюсь»). Для этой сингонии характерно или полное отсутствие элементов симметрии, или имеется в одном ее виде ось первого порядка  $L_1$  (в кристаллографии ею не пользуются), и в другом – есть только центр симметрии – считается важнейшим вид симметрии для триклинной сингонии.

Эту сингонию называют по-разному: анортитовой, асимметрической, трехклиномерной, – все из-за того, что в триклинной сингонии элементарная ячейка самая несимметричная. Осевые и угловые координаты для этой сингонии  $a \neq b \neq c$ ,  $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ , только поэтому три неравномерные оси расположены наклонно друг другу (табл. 2). В этой сингонии возможны только моноэдры и пинакоиды. К ней относятся кристаллы минералов: альбит, анортит, микроклин, дистен, бирюза, родонит и др.

2. **Моноклинная сингония** (от греч. «μνος» – «один, единый, единственный», «κλινω» – «наклоняюсь»). Прimitивная ячейка этой сингонии – параллелепипед с одним косым углом. Осевые и угловые координаты:  $a \neq b \neq c$ ,  $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ . Поэтому кристаллы имеют три оси неравной длины: две перпендикулярные друг другу, а третья наклонена (табл. 2). В эту сингонию входят 3 вида симметрии кристаллов, имеющих соответственно  $L_2$ ;  $P$ ;  $L_2PC$  (табл. 1). Для первых двух

видов симметрии характерны осевой и плоскостной диэдри. Последний набор элементов симметрии  $L_2PC$  считается важнейшим видом симметрии – характерна ромбическая призма. Поскольку ромбическая призма – открытая форма, поэтому встречается в комбинации с другими формами (пинакоидом). В этой сингонии кристаллизуются следующие минералы: ортоклаз, слюды, гипс, авгит, роговая обманка, малахит, азурит, вольфрамит и др.

**3. Ромбическая сингония.** Для ромбической сингонии характерна прямоугольная система координат, так как три оси неравной длины пересекаются под прямыми углами. Осевые и угловые координаты:  $a \neq b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .

Элементарная ячейка «кирпичик». Оси координат проходят вдоль осей  $L_2$  или нормально к плоскостям симметрии (табл. 2). В ромбической сингонии кристаллы можно разделить на 3 вида симметрии:  $3L_2$ ;  $L_22P$ ;  $3L_23PC$ . В первом (аксиальном) виде симметрии кристаллизуются ромбические тетраэдры, во втором (планальном) виде симметрии – характерны ромбические пирамиды, в третьем (планаксиальном) виде симметрии – ромбические дипирамиды. В этом виде симметрии кристаллизуется много минералов, природных и получаемых искусственно. Для примера из природных минералов отметим барит, серу, топаз, оливин.

Во всех трех видах симметрии ромбической сингонии встречается ромбическая призма, но только в комбинациях с другими кристаллическими формами.

## II. Средняя категория

К средней категории относятся кристаллы тригональной, тетрагональной и гексагональной сингоний, у всех их имеется одно-единственное (главное), неповторяющееся направление (одна ось симметрии выше второго порядка –  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_6$  – соответственно). Помимо главных осей в этих сингониях могут быть оси  $L_2$ , плоскости симметрии и центр симметрии.

В кристаллах триклинной, тетрагональной и гексагональной сингоний хорошо проявляется различие свойства вдоль и поперек главной оси симметрии.

От кристаллов низшей категории в кристаллах сингоний средней категории присутствуют моноэдр и пинакоид. Грани этих форм всегда перпендикулярны главной оси симметрии.

**4. Тригональная сингония** (от лат. «trigonalis» – «треугольный», от греч. «τρίγωνος» – того же значения). Главная ось  $L_3$ . Осевые и угловые координаты элементарной кристаллографической ячейки:  $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ .

В тригональную сингонию входят 5 видов симметрии:  $L_3$ ,  $L_3C$ ,  $L_33P$ ,  $L_33L_2$ ,  $L_33L_23PC$  (табл. 1). Первый (примитивный) вид симметрии  $L_3$  характерен для

форм минералов, кристаллизующихся в виде тригональной пирамиды. Второй (центральный) вид симметрии  $L_3C$  относится к кристаллам – ромбоэдрам. Третий (планальный) вид симметрии  $L_3P$  – это дитригональные пирамиды. Четвертый (аксиальный) вид симметрии  $L_3L_2$  – тригональные трапецоэдры. Пятый (планаксиальный) вид симметрии  $L_3L_2PC$  – тригональные скаленоэдры. Все кристаллы указанных выше видов симметрии замкнутые (закрытые) формы кристаллов. В классификации видов симметрии тригональной сингонии важнейшими формами являются тригональные и дитригональные призмы, но существовать в природе они могут только на кристаллах этой сингонии.

Важнейший, пятый вид симметрии тригональной сингонии отличается наличием большого количества кристаллизующихся минералов: корунд, кальцит, доломит и другие карбонаты, кварц, турмалин, киноварь, гематит.

**5. Тетрагональная сингония** (от греч. – «тетраγωνον» – «четырёхугольник, квадрат»). Главной осью для этой сингонии является ось четвертого порядка  $L_4$ . Осевые и угловые координаты для ее элементарной ячейки:  $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ . Характерны три взаимно перпендикулярные оси, из которых только две имеют одинаковую длину (табл. 2).

В тетрагональную сингонию входит 7 видов симметрии. Рассмотрим только 5 (кристаллы с инверсионными осями не рассматриваем). Выделим для описания следующие виды симметрии:  $L_4$ ;  $L_4PC$ ;  $L_44P$ ;  $L_44L_2$ ;  $L_44L_25PC$  (табл. 1). Первый (примитивный) вид симметрии  $L_4$  – выделяются кристаллы в виде тетрагональных пирамид. Второй (центральный) вид симметрии  $L_4PC$  – кристаллы – тетрагональные дипирамиды. Третий (планальный) вид симметрии  $L_44P$  – дитетрагональные пирамиды. Четвертый (аксиальный) вид симметрии  $L_44L_2$  – тетрагональные трапецоэдры. Пятый (планаксиальный) вид симметрии  $L_44L_25PC$  – кристаллы дитетрагональные дипирамиды.

В тетрагональной сингонии важнейшими формами кристаллов являются тетрагональные и дитетрагональные призмы, но встречаются они на кристаллах в комбинациях. Последний, пятый вид симметрии тоже является важнейшим. Из природных кристаллов минералов к тетрагональной сингонии в качестве примера можно отнести фергусонит, шеелит, циркон, касситерит, халькопирит и многие другие (табл. 2).

**6. Гексагональная сингония** (от греч. «ἕξ» – «шесть» и «γωνία» – «угол»). В эту сингонию входят кристаллы, у которых единичная (главная) ось – ось шестого порядка  $L_6$ . В составе этой сингонии выделяют 7 видов симметрии, два последних с инверсионными осями не входят в нашу программу. Рассмотрим следующие виды симметрии:  $L_6$ ,  $L_6PC$ ,  $L_66P$ ,  $L_66L_2$ ,  $L_66L_27PC$  (табл. 1).

В первом (планальном) виде симметрии  $L_6$  выделяют гексагональные пирамиды. Во втором (центральной) виде симметрии  $L_6PC$  – гексагональные дипирамиды. В третьем (примитивном) виде симметрии  $L_6BP$  – дигексагональные пирамиды. В четвертом (аксиальном) виде симметрии,  $L_6L_2$  – гексагональные трапецоэдры. В пятом (планаксиальном) виде симметрии  $L_6L_27PC$  – дигексагональные дипирамиды. Этот вид симметрии важнейший. Гексагональные и дигексагональные призмы самостоятельно не встречаются, ведь они открытые формы, поэтому их устанавливают в комбинациях с кристаллами этой сингонии. В этой сингонии кристаллизуются следующие кристаллы минералов – апатит, нефелин, высокотемпературный кварц, берилл, графит, пирротин, молибденит и мн. др.

Осевые и угловые координаты:  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ . Ее особенность – три равные оси в одной плоскости, пересекающиеся под углом  $120^\circ$ , и четвертая ось, перпендикулярная этой плоскости (табл. 2).

В средней категории во всех ее сингониях главная ось всегда принимается за ось  $Z$ , а оси  $X$ ,  $Y$  расположены в плоскости, перпендикулярной главной оси. Осевые отрезки по осям  $X$ ,  $Y$  здесь одинаковы (табл. 2).

Для гексагональной и тригональной сингоний применяют одинаковую систему координат: единственную ось  $L_3$  (в тригональной) или  $L_6$  (в гексагональной) принимают за ось  $Z$ . Оси  $X$  и  $Y$ , перпендикулярные оси  $Z$ , составляют между собой угол, равный  $120^\circ$ . По симметрии удобно добавлять к ним четвертую координатную ось  $L_4$ , расположенную в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$ , и под углом  $120^\circ$  к  $X$  и  $Y$ .

Примитивная в такой системе координат – прямоугольная призма, ее основание ромб с углом  $120^\circ$ . Три такие призмы вместе составляют шестигранную призму, уже не примитивную.

Для тригональной сингонии кристаллов можно выбирать элементарную ячейку в форме ромбоэдра (табл. 2), который удобно представлять как куб, растянутый или сжатый вдоль одной из его пространственных диагоналей так, что  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ . Такая система координат называется ромбоэдрической. Диагональ оказывается единичной осью симметрии  $L_3$  и принимается за ось  $Z$ .

### III. *Высшая категория симметрии*

К высшей категории симметрии относятся кристаллы единственной кубической сингонии, для которой свойственны только свои, особые формы. Здесь не встретятся пинакоиды, моноэдры, диэдры, призмы, пирамиды, дипирамиды. При определении простых форм следует исходить из числа их граней.

Характерной особенностью ее считается то, что три оси одинаковой длины пересекаются под прямыми углами (табл. 2).

7. **Кубическая сингония** включает 5 видов симметрии (табл. 1):  $4L_33L_2$ ,  $4L_33L_23PC$ ,  $4L_33L_26P$ ,  $3L_44L_36L_2$ ,  $3L_44L_36L_29PC$ .

Первый (примитивный) вид симметрии  $4L_33L_2$  – кристаллы пентагон-тритетраэдрические. Второй (центральный) вид симметрии  $4L_33L_23PC$  – кристаллы дидодекаэдры. Третий (планальный) вид симметрии  $4L_33L_26P$  – кристаллы гексатетраэдры. Четвертый (аксиальный) вид симметрии  $3L_44L_36L_2$  – кристаллы пентагон-триоктаэдры. Пятый (планаксиальный) вид симметрии  $3L_44L_36L_29PC$  – кристаллы гексоктаэдры. В этой сингонии образуются кристаллы следующих минералов: галит, гранат, золото, серебро, флюорит, магнетит, алмаз и другие.

Благодаря этим видам симметрии образовалось в кубической сингонии 15 простых форм кристаллов (рис. 59).

В процентном отношении кристаллы по категориям распределяются следующим образом:

- 1) в высшей категории они составили 12,5%;
- 2) в средней категории – 26,5%;
- 3) в низшей категории – 61%.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что больше всего кристаллов в низшей категории, за ней следует средняя, менее всего их в высшей.

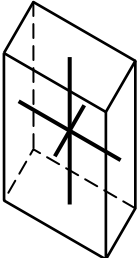
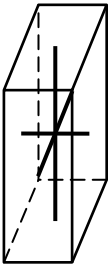
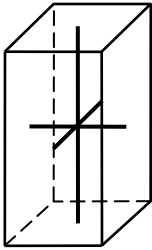
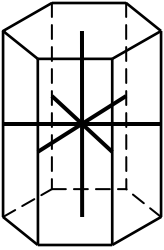
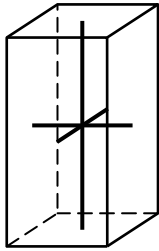
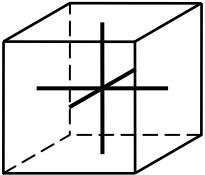
И.И. Шафранский и В.Ф. Алявдин (1985) приводят внешние определяющие признаки сингоний без предварительного нахождения всех элементов симметрии. Так, правильно образованные кристаллы не вытянутые и не сплюснутые, приближающиеся к шаровидной форме, обычно принадлежат к кубической системе (рис. 59). Чтобы окончательно в этом удостовериться, надо в них обнаружить  $4L_3$ . В кристаллах вытянутых или сплюснутых, если это направление совпадает с  $L_3$ , – кристаллы тригональной сингонии, с  $L_4$  – тетрагональной, с  $L_6$  – гексагональной (рис. 58). Если направление вытянутости или сплюснутости совпадает с  $L_2$  или не совпадает с осью симметрии – кристалл относится к низшей категории, а к какой ее сингонии – зависит от элементов симметрии (табл. 1).

Таблица 1

## 32 вида (класса) симметрии и распределение их по сингониям и категориям

Категории	Сингонии	Вид симметрии						
		Примитивный	Центральный	Планальный	Аксиальный	Планаксиальный	Инверсионно-примитивный	Инверсионно-планальный
Низшая	Триклинная	1 –	2 C					
	Моноклинная			3 P	4 L <sub>2</sub>	5 L <sub>2</sub> PC		
	Ромбическая			6 L <sub>2</sub> 2P	7 3L <sub>2</sub>	8 3L <sub>2</sub> 3PC		
Средняя	Тригональная	9 L <sub>3</sub>	10 L <sub>3</sub> C	11 L <sub>3</sub> 3P	12 L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub>	13 L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> 3PC		
	Тетрагональная	14 L <sub>4</sub>	15 L <sub>4</sub> PC	16 L <sub>4</sub> 4P	17 L <sub>4</sub> 4L <sub>2</sub>	18 L <sub>4</sub> 4L <sub>2</sub> 5PC	19 L <sub>i4</sub> ( $\equiv$ L <sub>2</sub> )	20 L <sub>i4</sub> ( $\equiv$ L <sub>2</sub> )2L <sub>2</sub> 2P
	Гексагональная	21 L <sub>6</sub>	22 L <sub>6</sub> PC	23 L <sub>6</sub> 6P	24 L <sub>6</sub> 6L <sub>2</sub>	25 L <sub>6</sub> 6L <sub>2</sub> 7PC	26 L <sub>i6</sub> =L <sub>3</sub> P	27 L <sub>i6</sub> 3L <sub>2</sub> 3P= =L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> 4P
Высшая	Кубическая	28 4L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub>	29 4L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> 3PC	30 4L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> ( <sub>3</sub> L <sub>i4</sub> )6P	31 3L <sub>4</sub> 4L <sub>3</sub> 6L <sub>2</sub>	32 3L <sub>4</sub> 4L <sub>3</sub> 6L <sub>2</sub> 9PC		

**Кристаллографические оси и сингонии (системы).****Осевые и угловые координаты. Формы кристаллов и минералов**

<b>Кристаллографические оси</b>	<b>Сингония</b>	<b>Форма кристалла</b>	<b>Минерал</b>
	Триклинная $a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Пары граней (пинакоидов), моноэдры	Альбит Анортит Дистен (кианит) Микроклин
	Моноклиная $a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Призмы и наклонные концевые грани (пинакоиды или моноэдры)	Гипс Мусковит Авгит Роговая обманка Ортоклаз
	Ромбическая $a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Ромбические призмы и пирамиды	Барит Сера Топаз Оливин
	Гексагональная $a = b \neq c, \gamma = 120^\circ,$ $\alpha = \beta = 90^\circ$	Шестигранные (гексагональные) призмы и пирамиды	Апатит Берилл Графит
	Тригональная $a = b \neq c, \gamma = 120^\circ,$ $\alpha = \beta = 90^\circ$	Трехгранные (тригональные) призмы и пирамиды, ромбоэдры	Кальцит Кварц Корунд Турмалин
	Тетрагональная $a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Квадратные призмы и пирамиды	Халькопирит Рутил Циркон Касситерит
	Кубическая $a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Куб	Алмаз Галит Флюорит Галенит Пирит

## ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ

В основе учения о кристаллографических формах природных кристаллов содержится два понятия: простая форма и комбинация. Последняя представляет собой совокупность нескольких простых форм, в образовании названий этих форм участвуют корни греческих слов:

моно – один	син – вместе
ди – два	гония – угол
три – три	клино – наклоняю
тетра – четыре	пинакс – доска
пента – пять	скалена – косой, неровный
гекса – шесть	трапеца – четырехугольник, с двумя
окта – восемь	параллельными сторонами
дека – десять	чеми – половина
додека – двенадцать	энантио – противоположный, обратный
эдра – грань	морфо – форма, образ, вид

Под *простой формой* в кристаллографии понимают совокупность граней, выводящихся с помощью элементов симметрии из одной заданной грани. Поэтому всякая простая форма должна состоять из одинаковых граней по размеру и контуру, связанных элементами симметрии.

При отсутствии искажений все грани одной простой формы одинаковы, а кристаллы из них называются правильно ограниченными.

Простая форма кристалла может состоять из одной-единственной грани (моноэдр – многогранник) или даже из 48 граней (гексоктаэдр, что означает: в кристалле шесть октаэдров, в каждом из них восемь граней –  $6 \cdot 8 = 48$ ).

Кристалл в форме куба – простая форма, так как путем поворотов вокруг осей симметрии или с помощью отражений в плоскостях симметрии все его шесть граней выводятся из одной заданной грани (рис. 22, а). Это относится и к октаэдру – восьмиграннику (рис. 22, б). Или возьмем простую форму в виде гексагональной пирамиды: все шесть ее граней могут быть выведены с помощью шести поворотов одной грани вокруг оси шестого порядка  $L_6$  на  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $300^\circ$ ,  $360^\circ$ . Таким образом, существующее требование: все грани простой формы должны быть одинакового контура и размера, выведены при помощи



элементов симметрии из одной грани – легко выполняется не только на приведенных для примера формах кристаллов (куба, октаэдра, гексагональной пирамиды), но и на других простых формах. И еще, чем больше элементов симметрии в кристалле, тем выше его сингония, и наоборот.

Совокупность двух или нескольких простых форм в кристалле называют **комбинацией**. При подсчете простых форм, входящих в комбинацию, следует исходить из числа различных сортов граней. Возьмем для примера комбинацию куба с октаэдром на кристалле куприта. Он состоит из шести больших граней восьмиугольной формы и восьми маленьких треугольников (рис. 22, в). Первый тип граней относится к кубу (рис. 22, а), а второй – к октаэдру (рис. 22, б). В результате образовался кубооктаэдр с преобладанием куба (рис. 22, в).

В других случаях может образовываться комбинация куба с преобладанием октаэдра.

Простую форму из четырех одинаковых граней, которые попарно параллельны (через одну), а поперечное сечение – ромб, называют ромбической призмой (рис. 23, в).

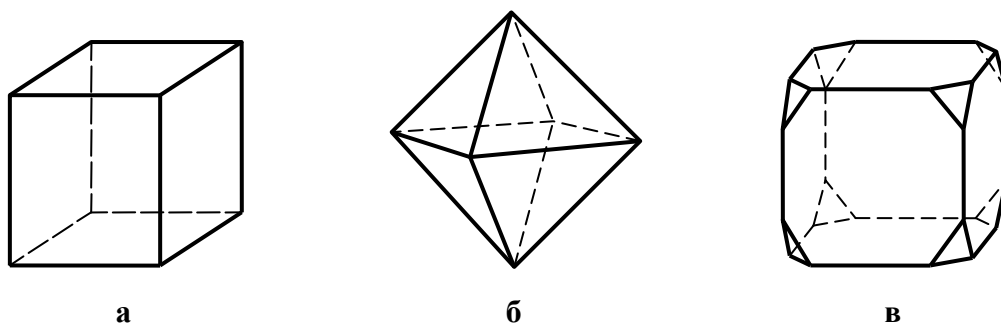


Рис. 22. Комбинация куба с октаэдром: а – куб; б – октаэдр; в – кубооктаэдр

Ромбическая призма находится в комбинации с пинакоидом (грань в основании призмы и верхняя ее грань). Больше вводить в эту комбинацию другие простые формы не следует. Например, диэдров здесь нет.

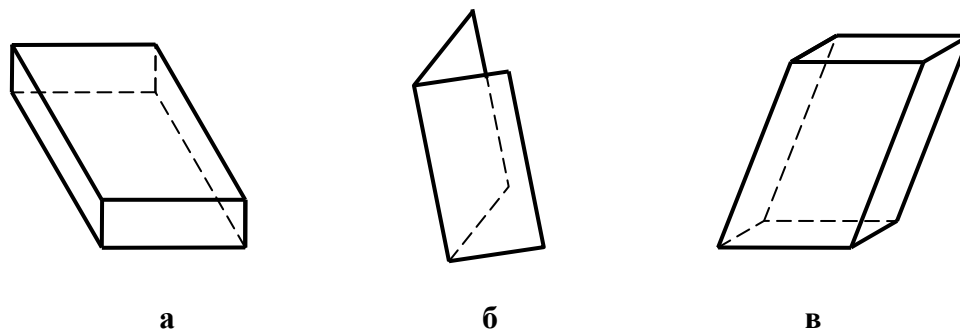


Рис. 23. Формы комбинаций: а – форма кирпичика; б – диэдр; в – ромбическая призма

Другой пример: допустим, имеем кристалл в форме кирпичика или спичечного коробка (рис. 23, а), у них три пары попарно параллельных граней. Грани каждой отдельной пары равны, но отличаются по величине от длин граней двух других пар. Значит, кирпичик является комбинацией трех пинакоидов (рис. 23, а).

Одни простые формы свойственны только определенным сингониям, другие разным (например, моноэдры, пинакоиды, диэдры).

Рассмотрим простые формы по сингониям.

## ПРОСТЫЕ ФОРМЫ СИНГОНИЙ НИЗШЕЙ КАТЕГОРИИ

В триклинной, моноклинной и ромбической сингониях низшей категории симметрии насчитывается всего 7 простых форм (табл. 1). Рассмотрим каждую из них отдельно по сингониям.

I. В *триклинной сингонии* выделяют:

1. *Моноэдр* – многогранник, простая форма, состоящая из одной-единственной грани, не связанной элементами симметрии с другими гранями фигур, поэтому встречается лишь в комбинациях (рис. 24, 1).

2. *Пинакоид* (от греч. «πιναξ» – «доска» и «εἶδος» – «вид, форма») – простая форма, состоящая из двух одинаковых параллельных граней. Встречается только в комбинациях. Комбинацию из трех пинакоидов в ромбической сингонии представляет кристалл в форме «кирпичика (рис. 24, 2).

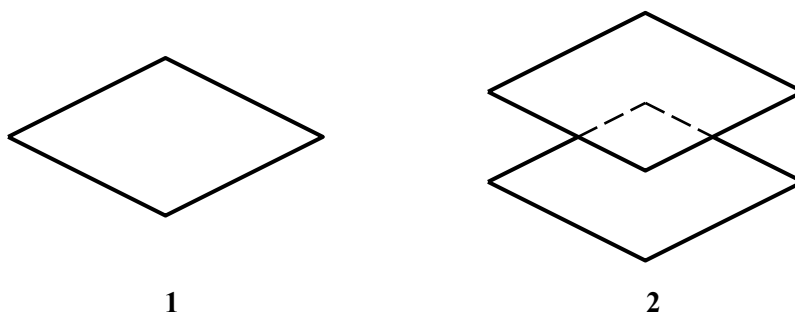


Рис. 24. Простые формы триклинной сингонии: 1 – моноэдр; 2 – пинакоид

II. В *моноклинной сингонии* характерны две простые формы – диэдр и ромбическая призма. У первой формы сохраняется моноэдр, у второй – пинакоид.

1. *Диэдр* – простая форма из двух одинаковых пересекающихся граней (рис. 25, 3). Наглядной моделью диэдра может служить двухскатная крыша или раскрытая книга.

Он может быть осевой, когда две его грани пересекаются по оси симметрии второго порядка  $L_2$  (рис. 25, 3а), и плоскостной, в котором две грани связаны между собой плоскостью симметрии (рис. 25, 3б).

2. **Ромбическая призма** – простая форма, состоящая из четырех граней, попарно параллельных (через одну). Поперечное сечение формы – ромб. На рис. 25 ромбическая призма находится в комбинации с пинакоидом, представленным двумя параллельными гранями (гранью в основании ромбической призмы и гранью сверху ее). Эту форму включают в моноклинную сингонию из-за косоугольности, сходной с диэдром (рис. 25, 4).

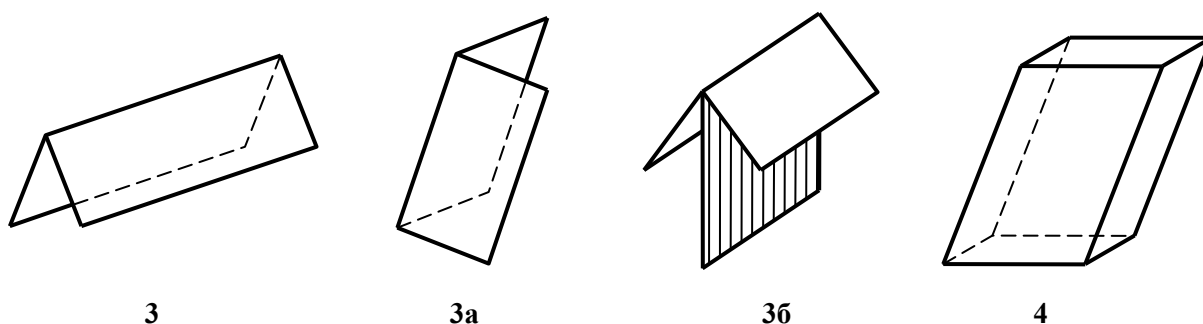


Рис. 25. Простые формы моноклинной сингонии: 3 – диэдр; 3а – диэдр осевой; 3б – диэдр плоскостной; 4 – ромбическая призма, пинакоид

### III. **Ромбическая сингония**

1. В состав ромбической сингонии входят следующие простые формы: моноэдр, пинакоид, диэдр, при их совместном действии образуется **ромбический тетраэдр**, у которого в поперечном сечении ромб, а грани – косоугольные непараллельные треугольники. Тетраэдр может быть правым и левым (рис. 26, 5). Совместить эти формы можно только с помощью отражения в плоскости симметрии.

Такие две зеркально равные формы называются энантиоморфными. Подобного рода формы имеются и в других сингониях, которые укажем позже.

2. Второй простой формой в этой сингонии является **ромбическая пирамида**.

Состоит она из четырех одинаковых граней, пересекающихся в одной точке – вершине. Основание пирамиды – ромб. Представляет комбинацию с моноэдром (рис. 26, 6). Симметрия такой формы –  $L_22P$  (ромбическая сингония).

3. **Ромбическая дипирамида**. Это единственная простая форма низшей категории, состоящая из 8 граней, образующих замкнутый многогранник из двух сложенных основаниями одинаковых ромбических пирамид. Отсюда и название ее – дипирамида, что означает «двойная пирамида» (рис. 26, 7).

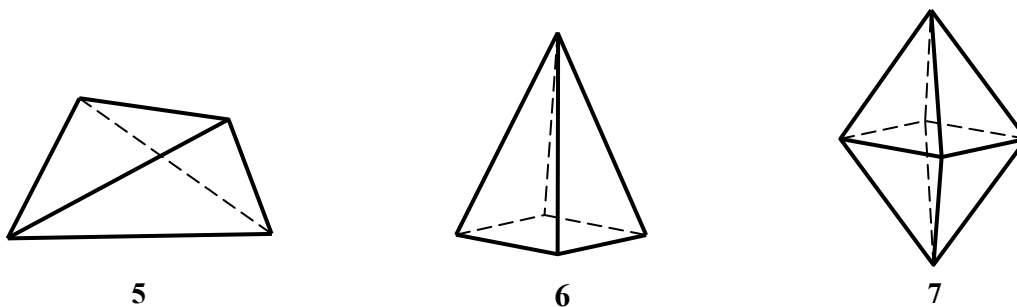


Рис. 26. Простые формы ромбической сингонии: 5 – тетраэдр;  
6 – ромбическая пирамида; 7 – ромбическая дипирамида

Рассмотрев сингонии низшей категории в целом, можно отметить:

1. Отсутствие осей симметрии выше второго порядка (например, симметрия ромбической дипирамиды  $3L_23PC$ ).
2. Преобладание открытых, не замыкающих пространство форм (моноэдр одногранник, пинакоид, диэдры, призма ромбическая, ромбическая пирамида). Закрытые – замыкающие пространство формы: ромбический тетраэдр и ромбическая дипирамида.
3. Относительная простота комбинаций.

В результате сделаем следующее заключение:

- а) во всех трех сингониях низшей категории – триклинной, моноклинной и ромбической встречаются моноэдры и пинакоиды;
- б) в триклинной сингонии могут быть только моноэдры и пинакоиды;
- в) диэдры и ромбические призмы свойственны моноклинной и ромбической сингониям;
- г) ромбические пирамида и дипирамида относятся только к ромбической сингонии.

## ПРОСТЫЕ ФОРМЫ СИНГОНИЙ СРЕДНЕЙ КАТЕГОРИИ

Тригональная, тетрагональная и гексагональная сингонии средней категории характеризуются своими простыми формами, при образовании которых принимают участие две простые формы – моноэдр и пинакоид – из сингоний низшей категории. Необходимо отметить, что грани этих двух форм всегда перпендикулярны главной оси кристалла –  $L_3$ ,  $L_4$  и  $L_6$  (инверсионные оси не изучаем), указанные значения главных осей служат для определения характерных *простых форм сингоний средней категории* (за исключением особых форм, описываемых отдельно).

В составе сингоний средней категории простые формы представлены призмами, дипризмами (удвоенными призмами), пирамидами и дипирамидами (удвоенными пирамидами). Они различаются по сингониям в зависимости от порядка оси и формы поперечного сечения, перпендикулярного главной оси: тригональные – в поперечном сечении равносторонний треугольник (тригон), тетрагональные – в сечении квадрат (тетрагон), гексагональные – в сечении правильный шестиугольник (гексагон).

***Грани призм пересекаются по ребрам, параллельным главной оси, у пирамид – по ребрам, сходящимся в одной точке на главной оси.***

Каждая грань призмы или пирамиды может быть удвоена, в этом случае в поперечных сечениях образуются дитригон, дитетрагон и дигексагон. Удвоение сторон здесь не ведет к повышению симметрии многоугольника: шесть сторон дитригона связаны между собой не осью шестого порядка  $L_6$ , а осью третьего  $L_3$ . Подобное относится и к дитетрагону, и к дигексагону: углы у них равны друг другу, но не соседние, а чередующиеся через один. Соответственно получаются дитригональные, дитетрагональные и дигексагональные призмы и пирамиды.

Добавление плоскости, перпендикулярной главной оси, превращает пирамиды в дипирамиды: ромбическую, тригональную, тетрагональную, гексагональную.

Все простые формы сингоний средней категории опишем ниже и приведем соответствующие рисунки.

**IV. Тригональная сингония** – в ее характерных формах выявляются от прежних сингоний: моноэдр и пинакоид.

Типичными формами сингонии являются:

1. **Тригональная призма**: три одинаковые грани параллельны оси третьего порядка  $L_3$  (рис. 27, 1), находятся в комбинации с пинакоидом (две параллельные грани – одна в основании тригональной призмы, другая является покрывающей ее сверху).

В поперечном сечении – равносторонний треугольник (тригон). Тригональные призмы характерны для кристаллов тригональной сингонии.

2. **Дитригональная призма** есть не что иное, как удвоенная тригональная призма, состоящая из шести одинаковых граней; в поперечном сечении ее – шестиугольник (дитригон) с углами, повторяющимися через один.

Удвоение сторон простых форм не повышает симметрию многоугольника, так как ось третьего порядка остается прежней, хотя число граней удваивается (рис. 27, 2), но важную роль играют углы, повторяющиеся через один.

3. **Тригональная пирамида** представляет собой простую форму, у которой три грани в форме равнобедренных треугольников пересекаются в одной точке

на  $L_3$ , совпадающие с вершиной формы; в поперечном сечении такая форма дает равносторонний треугольник – тригон (рис. 27, 3). Тригональная пирамида отражает комбинацию с моноэдром в основании ее. Относится к тригональной сингонии.

4. **Дитригональная пирамида** – это удвоенная тригональная пирамида; в ней 6 одинаковых граней, в поперечном сечении она дает шестиугольник – дитригон – с углами, повторяющимися через один (рис. 27, 4). Эта пирамида составляет комбинацию с моноэдром (основанием ее). Относится к тригональной сингонии, главная ось  $L_3$  из-за удвоения граней не меняется.

5. **Тригональная дипирамида** – две тригональные пирамиды, сложенные основаниями, состоящие из шести одинаковых граней, пересекающие главную ось  $L_3$  в двух точках. Три грани, обращенные вверх, оказываются точно на трех нижних гранях. Поперечное сечение такой формы – правильный треугольник – тригон (рис. 27, 5). Тригональную дипирамиду можно построить из двух тригональных пирамид. Такой формы кристаллы относятся к тригональной сингонии.

6. **Дитригональная дипирамида** – две объединенные тригональные пирамиды (рис. 27, 6), состоит из 12 граней: 6 граней внизу и 6 –верху. Грани, обращенные вверх, совершенно точно оказываются на нижних.

7. **Ромбоэдр** – форма из шести граней в виде ромба, напоминающего куб, вытянутый или сжатый по одной из осей третьего порядка  $L_3$  (рис. 27, 7). Верхняя тройка ромбов повернута относительно нижней тройки ромбов на  $60^\circ$  вокруг главной оси.

8. **Тригональный трапецоэдр** образован гранями в форме четырехугольников с двумя равными смежными сторонами (рис. 27, 8).

9. **Тригональный скаленоэдр** образован гранями, имеющими форму неравносторонних треугольников. В скаленоэдрах верхняя и нижняя пирамиды повернуты друг относительно друга на угол, равный половине элементарного угла поворота вокруг главной оси  $L_3$ . Форма скаленоэдра закрытая (замкнутая со всех сторон) (рис. 27, 9). Относится к тригональной сингонии.

#### V. **Тетрагональная сингония**

Здесь, в характеризующих ниже простых формах этой сингонии, встретим моноэдр и пинакоид, образующие в поперечном сечении квадрат (тетрагон).

1. **Тетрагональная призма** (рис. 28, 1) состоит из четырех граней, параллельных главной оси  $L_4$ . В поперечном сечении она образует квадрат (тетрагон). Тетрагональные призмы встречаются на кристаллах тетрагональной сингонии.

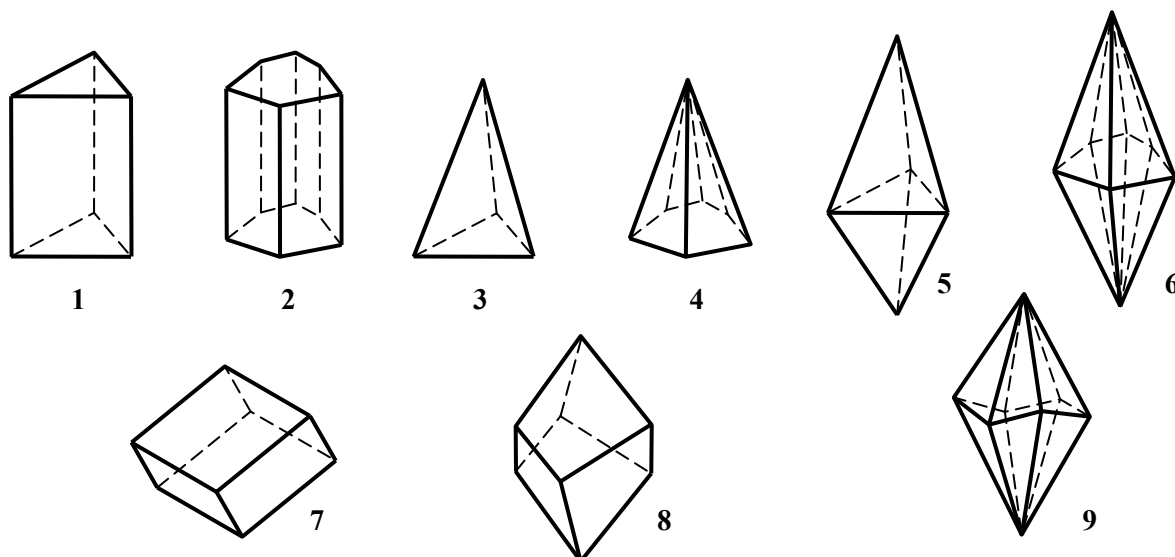


Рис. 27. Простые формы тригональной сингонии: 1 – тригональная призма; 2 – дитригональная призма; 3 – тригональная пирамида; 4 – дитригональная пирамида; 5 – тригональная дипирамида; 6 – дитригональная дипирамида; 7 – ромбоэдр; 8 – тригональный трапецоэдр; 9 – тригональный скаленоэдр

2. **Дитетрагональная призма** – удвоенная тетрагональная призма, состоящая из 8 одинаковых граней, параллельных оси  $L_4$  – сдвоенный квадрат, в поперечном сечении – тетрагон с углами, повторяющимися через один (рис. 28, 2). Эта призма находится в простой комбинации с дитетрагоном (сдвоенным тетрагоном).

3. **Тетрагональная пирамида** (рис. 28, 3) образована из четырех граней, пересекающихся в одной точке в вершине на оси  $L_4$ , в основании – правильный четырехугольник (тетрагон), составивший с формой комбинацию.

4. **Дитетрагональная пирамида** – две объединенные тетрагональные пирамиды (рис. 28, 4), обладает 8 одинаковыми гранями, в основании пирамиды – дитетрагон (сдвоенный квадрат), получившийся от удвоения пирамид.

5. **Тетрагональная дипирамида** – две сдвоенные тетрагональные пирамиды (рис. 28, 5), восемь граней которых, пересекаются на  $L_4$  в двух точках (внизу и вверху). При вертикально поставленной  $L_4$  четыре грани дипирамиды обращены вверх, а четыре – вниз, причем последние точно лежат под верхними гранями. Поперечное сечение такой дипирамиды – квадрат (тетрагон). Форма эта состоит как бы из двух тетрагональных пирамид, сложенных основаниями. Такой формы кристаллы встречаются только в тетрагональной сингонии.

6. **Дитетрагональная дипирамида** – две тетрагональные дипирамиды объединены в одну дитетрагональную дипирамиду (рис. 28, 6). В ней 8 граней, обращенных вверх, и 8 граней – вниз, те и другие пересекаются на главной оси

$L_4$  в двух точках. Грани расположены так, что верхние грани оказываются точно на нижних. В поперечном сечении содержится дитетрагон.

7. **Тетрагональный тетраэдр** – четыре непараллельные грани в виде равнобедренного треугольника (рис. 28, 7), образовавшие в поперечном сечении квадрат (рис. 28, 8).

8. **Тетрагональный трапецоэдр** – грани четырехугольников с двумя равными смежными сторонами. Грани расположены под косыми углами к главной оси и составляют неравные углы с осями второго порядка  $L_2$ , перпендикулярными главной оси. Верхняя и нижняя «пирамидки» трапецоэдров повернуты друг относительно друга вокруг оси второго порядка и не связаны между собой. Поворот не фиксируется операциями симметрии кристалла. Этим он отличается от тетрагональной дипирамиды (рис. 28, 8).

9. **Тетрагональный скаленоэдр** образован гранями, имеющими форму неравносторонних треугольников (рис. 28, 9).

Тетрагональный скаленоэдр можно описать как дитетрагональный тетраэдр (переломанный тетрагональный ромбоэдр), т.е. как форму, полученную путем удвоения граней тетрагонального тетраэдра.

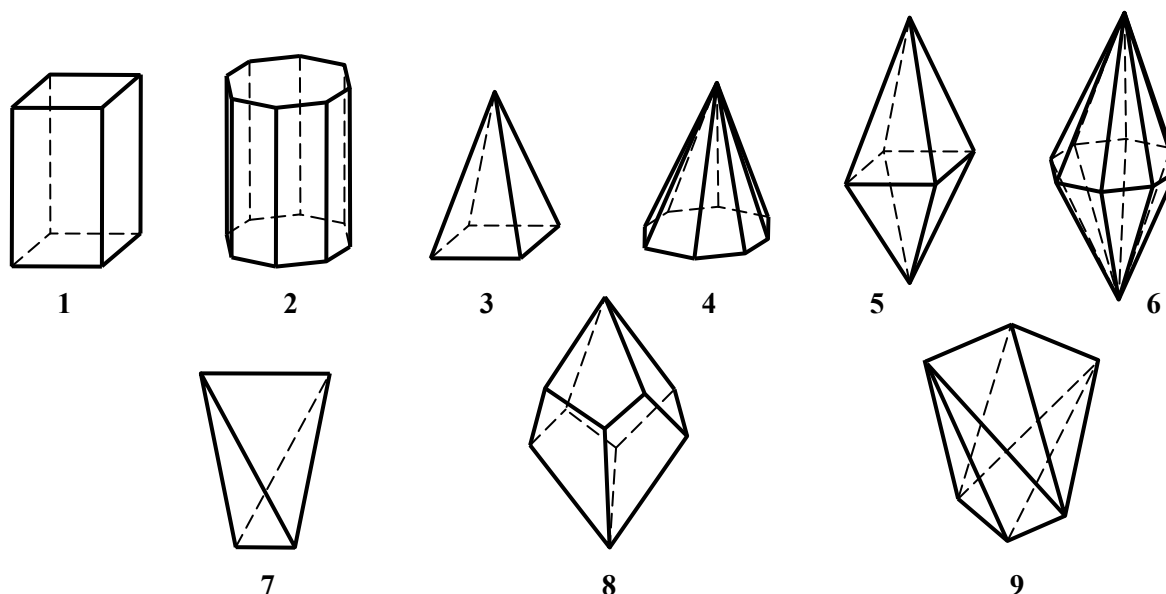


Рис. 28. Простые формы тетрагональной сингонии: 1 – тетрагональная призма; 2 – дитетрагональная призма; 3 – тетрагональная пирамида; 4 – дитетрагональная пирамида; 5 – тетрагональная дипирамида; 6 – дитетрагональная дипирамида; 7 – тетрагональный тетраэдр; 8 – тетрагональный трапецоэдр; 9 – тетрагональный скаленоэдр

## VI. Гексагональная сингония

Подобно другим сингониям средней категории в ее формах выделяются те же моноэдр и пинакоид. А собственные простые формы следующие.



1. **Гексагональная призма** имеет шесть попарно параллельных прямоугольных граней, образующих в поперечном сечении правильный шестиугольник – гексагон (рис. 29, 1). Призма находится в комбинации с гексагоном.

2. **Дигексагональная призма** – удвоенная гексагональная призма, отчего у нее в поперечном сечении и появился двенадцатигранник (дигексагон) с углами, повторяющимися через один (рис. 29, 2).

3. **Гексагональная пирамида** – это шесть треугольных граней, сходящихся в вершине – в точке на оси  $L_6$  и дающих в поперечном сечении правильный шестиугольник – гексагон (рис. 29, 3).

4. **Дигексагональная пирамида** – две совмещенные гексагональные пирамиды, в поперечном сечении образующие двенадцатиугольник с углами, повторяющимися через один (рис. 29, 4).

5. **Гексагональная дипирамида** – это две гексагональные пирамиды (рис. 29, 5), сложенные основаниями. В поперечном сечении имеется шестиугольник (гексагон).

6. **Дигексагональная дипирамида** – две объединенные дигексагональные пирамиды (рис. 29, 6). Ее составляют 24 грани – 12 граней вверху и 12 граней внизу, расположенные так, что верхние грани точно расположены на нижних. В поперечном сечении – дигексагон, углы которого повторяются через один.

7. **Гексагональный трапецоэдр** (рис. 29, 7) – шесть граней в виде четырехугольников с двумя равными смежными сторонами. Эти грани расположены под косыми углами к главной оси и составляют неравные углы с осями второго порядка  $L_2$ , перпендикулярными главной оси. Верхняя и нижняя «пирамидки» трапецоэдров повернуты друг относительно друга вокруг оси второго порядка и связаны между собой. Поворот не фиксируется операциями симметрии кристалла. Этим трапецоэдр отличается от гексагональной дипирамиды, с которой его легко спутать. Сечение – шестиугольник (гексагон).

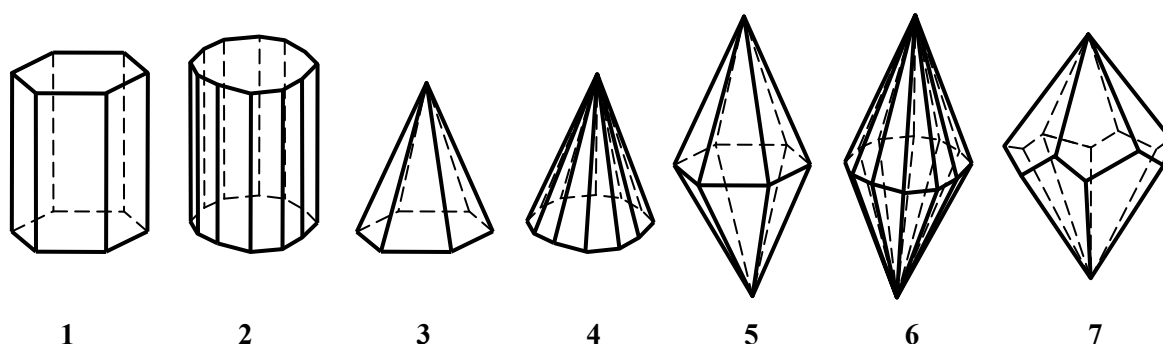


Рис. 29. Простые формы гексагональной сингонии: 1 – гексагональная призма; 2 – дигексагональная призма; 3 – гексагональная пирамида; 4 – дигексагональная пирамида; 5 – гексагональная дипирамида; 6 – дигексагональная дипирамида; 7 – гексагональный трапецоэдр

## ПРОСТЫЕ ОСОБЫЕ ФОРМЫ СИНГОНИЙ СРЕДНЕЙ КАТЕГОРИИ

(указаны в сингониях, к которым принадлежат, а здесь приведены как особые формы)

Все они могут быть правыми и левыми, выделены отдельно как особые формы, чтобы представлять их отличие друг от друга.

1. **Ромбические** тетраэдры, правый и левый (рис. 30, 1а, 1б). Грани – косоугольные треугольники, а сечение, нормальное к  $L_2$  – ромб.

2. **Трапецоэдры**: тригональный, тетрагональный, гексагональный – правые и левые (рис. 30, 2а, 2б, 3а, 3б, 4а, 4б). Грани – четырехугольники с двумя смежными равными сторонами.

3. **Ромбоэдр** (рис. 30, 5) – куб, вытянутый или сжатый по одной из осей  $L_3$ . Грани имеют форму ромбов, причем верхняя тройка ромбов повернута относительно нижней тройки ромбов на  $60^\circ$  вокруг главной оси.

4. **Скаленоэдры** (рис. 30, 6, 7) – тетрагональный и тригональный – образованы путем удвоения граней тетраэдра и ромбоэдра, имеющих форму неравно-сторонних треугольников.

Удвоение граней тетраэдра и ромбоэдра происходит так, что грань делится пополам вдоль нормальной к ней плоскости симметрии. Поэтому в скаленоэдрах верхняя и нижняя пирамиды повернуты друг относительно друга на угол, равный половине элементарного угла поворота вокруг главной оси, пара верхних граней расположена симметрично между двумя парами нижних граней. В этом характерное отличие скаленоэдра от трапецоэдров и дипирамид.

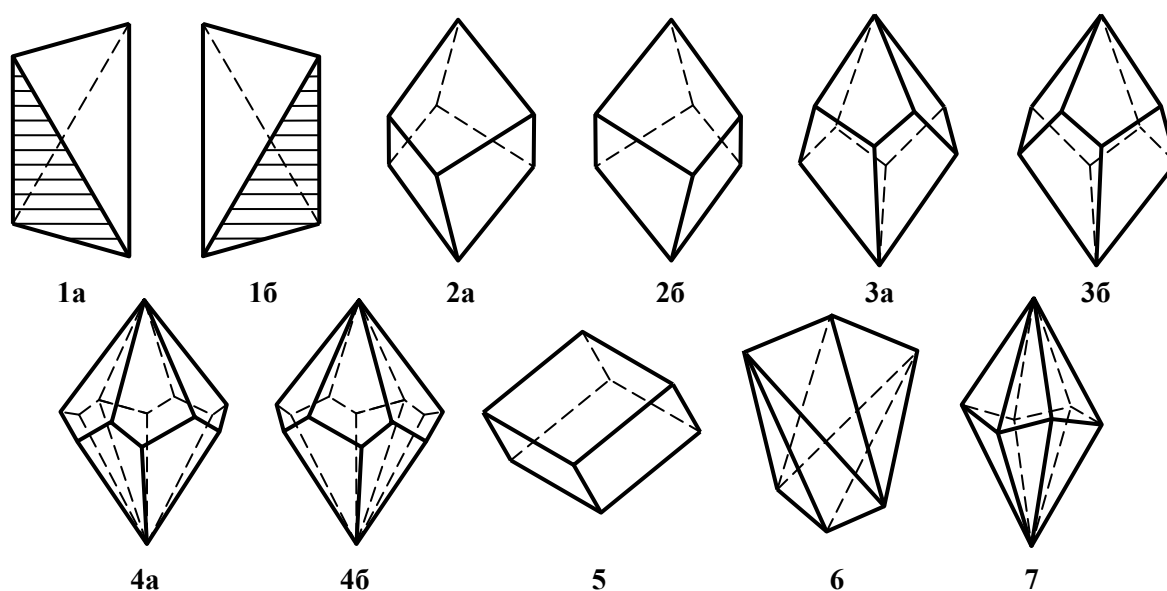


Рис. 30. Ромбические тетраэдры: 1а, 1б – левый, правый; трапецоэдры: 2а, 2б – тригональный правый и левый; 3а, 3б – тетрагональный правый и левый; 4а, 4б – гексагональный правый и левый; 5 – ромбоэдр; скаленоэдры: 6 – тетрагональный, 7 – тригональный

## ПРОСТЫЕ ФОРМЫ СИНГОНИЙ ВЫСШЕЙ КАТЕГОРИИ

В высшей категории имеется всего одна так называемая *кубическая сингония*. Все простые формы этой сингонии закрытые и в других сингониях не встречаются. Здесь нет моноэдров, пинакоидов, диэдров, призм, пирамид и дипирамид. Этому способствует наличие четырех осей третьего порядка  $4L_3$  во всех видах симметрии кубической сингонии. В этой сингонии с помощью всего трех простых форм – тетраэдра, октаэдра и куба (гексаэдра) – можно вывести и остальные 12 простых форм кристаллов, удваивая, утраивая, учетверяя и даже ушестеряя число граней.

Все формы разобьем на три группы, по пять форм в каждой. Одна группа будет содержать формы, являющиеся усложнением тетраэдра, а другая – октаэдра. Обе группы аналогичны, третья – группа куба.

### *I группа – простые формы тетраэдра*

*Тетраэдр* (кубический тетраэдр) – это замкнутый четырехгранник с гранями в виде правильных равносторонних треугольников; перпендикулярно к каждой из них проходит одна из четырех тройных осей  $4L_3$  симметрии. В кубической сингонии это единственная простая форма, у которой четыре грани (рис. 31, 1).

Стоит «надстроить» на гранях тетраэдра по три треугольника, четырехугольника, пятиугольника, получим тригонритетраэдр (рис. 31, 2), тетрагонритетраэдр (рис. 31, 3) пентагонритетраэдр (рис. 31, 4), а если на каждую грань тетраэдра надстроить по шесть треугольников, получится гексатетраэдр (рис. 31, 5).

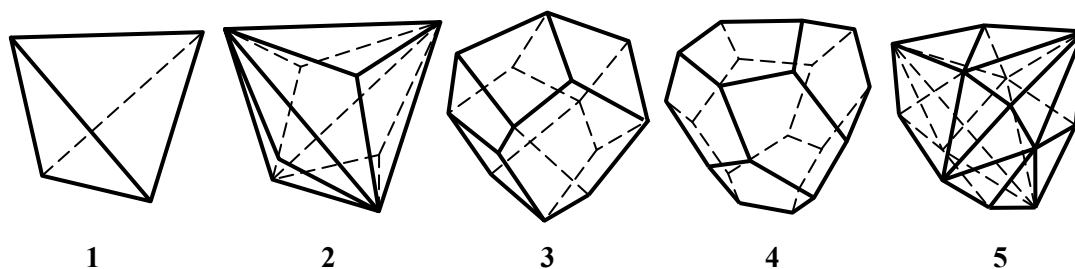


Рис. 31. I группа тетраэдра: 1 – тетраэдр; 2 – тригонритетраэдр; 3 – тетрагонритетраэдр; 4 – пентагонритетраэдр; 5 – гексатетраэдр

### *II группа – простые формы октаэдра*

*Октаэдр* – простая форма из восьми граней в виде правильных (равносторонних) одинаковых треугольников. Грани октаэдра попарно параллельны, и перпендикулярно им проходят четыре оси третьего порядка –  $4L_3$ . Октаэдр – единственный восьмигранник в кубической сингонии. Встречается в виде природных кристаллов алмаза, магнетита и др. (рис. 32, 1).

Аналогично группе I из октаэдра (рис. 32, 1) получают тригонтриоктаэдр, (по три треугольника на каждой грани октаэдра) (рис. 32, 2), тетрагонтриоктаэдр (по три четырехугольника) (рис. 32, 3), пентагонтриоктаэдр (по три пятиугольника) (рис. 32, 4) и 48-гранник, или гексоктаэдр (по шесть треугольников на каждой грани октаэдра) (рис. 32, 5).

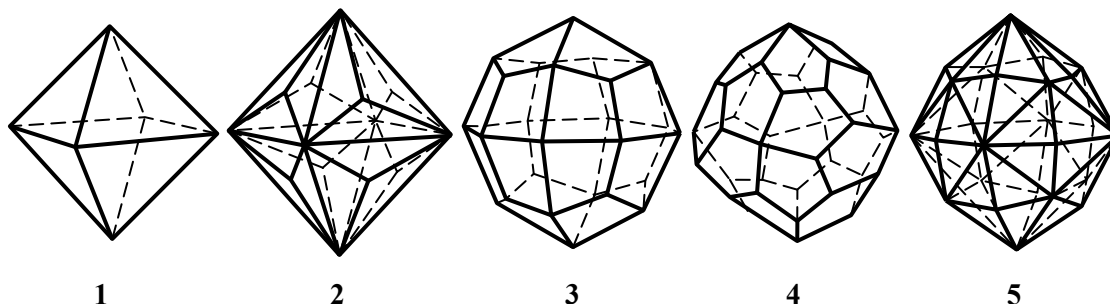


Рис. 32. II группа октаэдра: 1 – октаэдр; 2 – тригонтриоктаэдр; 3 – тетрагонтриоктаэдр; 4 – пентагонтриоктаэдр; 5 – гексоктаэдр

### **III группа – простые формы куба**

**Куб (гексаэдр)** – простая форма, состоит из 6 одинаковых граней в виде квадрата. Грани попарно параллельны, перпендикулярно им проходят три оси четвертого порядка  $3L_4$  (рис. 33, 1) или в случае их отсутствия три оси второго порядка  $3L_2$  (рис. 33, 4).

Галенит, флюорит, пирит, галит кристаллизуются в форме кубов.

В кубической сингонии характерны удвоения форм. Надстраивая на гранях куба четыре одинаковых равнобедренных треугольника, сходящихся вершинами в центре подобно правильной четырехскатной крыше, получаем пирамидальный куб (тетрагексаэдр) (рис. 33, 2). Притупляя ребра куба гранями, одинаково наклоненными к координатным осям, получаем ромбический додекаэдр, 12 граней которого имеют форму ромбов (рис. 33, 3). Надстраивая на гранях куба двухскатные крыши, получаем пентагондодекаэдр, 12 граней которого имеют форму пятиугольников (рис. 33, 4). Удваивая каждую грань пентагондодекаэдра, получаем дидодекаэдр (рис. 33, 5).

**Ромбододекаэдр** – двенадцатигранник, грани которого имеют форму одинаковых ромбов. Эта форма характерна для кристаллов граната и др. минералов.

Грани попарно параллельны (рис. 33, 3).

**Пентагондодекаэдр** – эта простая форма тоже двенадцатигранник, но грани в форме неправильных пятиугольников. Грани попарно параллельны, причем четыре стороны у него равны, а пятая отличается от них (рис. 33, 4).

Пирит  $FeS_2$  кристаллизуется особенно часто в виде пентагондодекаэдрической простой формы (рис. 33, 4), но он дает кристаллы и в виде куба.

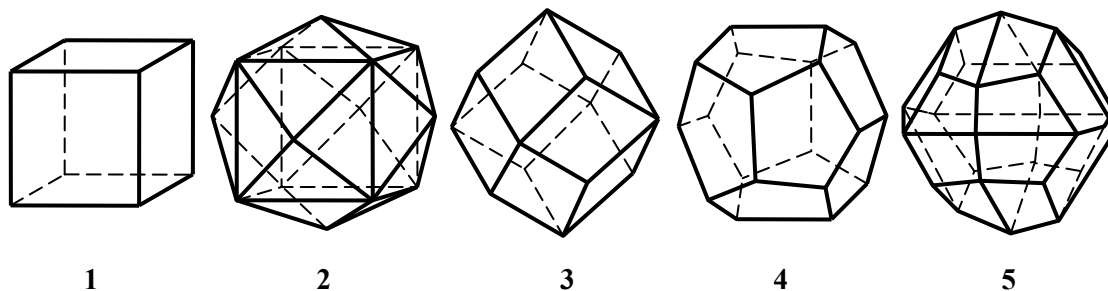


Рис. 33. III группа форм из куба: 1 – куб (гексаэдр); 2 – тетрагексаэдр; 3 – ромбический додекаэдр; 4 – пентагондодекаэдр; 5 – дидодекаэдр

Всего в трех категориях, 7 сингониях и 32 классах оказалось 47 простых форм кристаллов, встречаемых в природе, но не всегда в совершенном ограничении.

Простые формы бывают открытые и закрытые. Первые характеризуются тем, что не замыкают пространство со всех сторон, вторые замыкают его.

К открытым формам относятся:

1. Моноэдр – форма из одной грани.
2. Диэдр – форма из двух пересекающихся граней.
3. Пинакоид – форма из двух параллельных граней.
4. Призма – форма из трех и более граней, пересекающихся по параллельным ребрам. По форме поперечного сечения призмы называются ромбическими, триганальными, гексагональными, тетрагональными, дитетрагональными и т.д.

5. Пирамиды – простые формы, состоящие из трех или большего числа граней, пересекающихся в одной точке. Форма поперечного сечения подобно призме кладется в основу ее наименования: ромбическая, тригональная и т.д.

К закрытым простым формам относятся:

1. Дипирамиды – представляющие собой две одинаковые пирамиды, сложенные своими основаниями. Они различаются по числу граней.

2. Скаленоэдры (тетрагональный и тригональный) и трапецоэдры (тригональный и гексагональный) – простые формы, сходные с дипирамидами, но с боковыми ребрами, непараллельными между собой, их боковые ребра не лежат в одной плоскости. Грани их – неравносторонние (разносторонние) треугольники.

3. Ромбоэдр – форма, грани которой имеют форму ромбов, представляет собой куб, деформированный вдоль оси  $L_3$  (телесной диагонали).

4. Тетраэдры ромбической и тетрагональной формы, состоящие из четырех треугольных непараллельных граней.

Сюда же относятся 15 закрытых простых форм кубической сингонии. Все открытые и закрытые формы приведены на рис. 34, 35 и 36 (с. 62–63), а на с. 64, в табл. 3, представлены все категории, сингонии в каждой из них, номер формы на рисунке, название простых форм и число граней в форме.

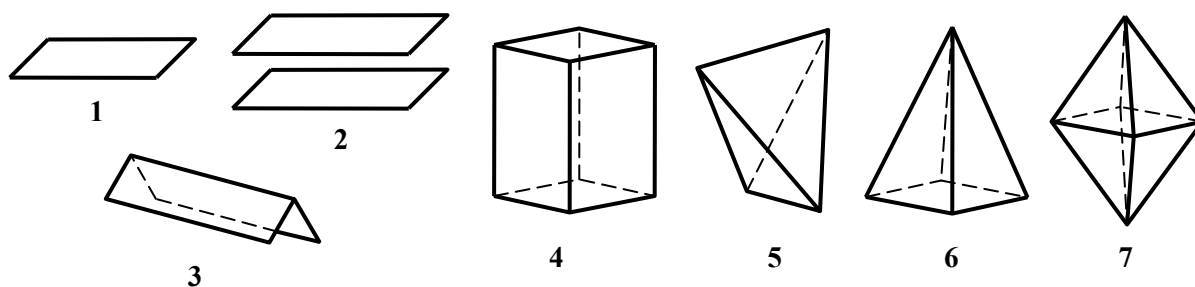


Рис. 34. Простые формы сингоний низшей категории

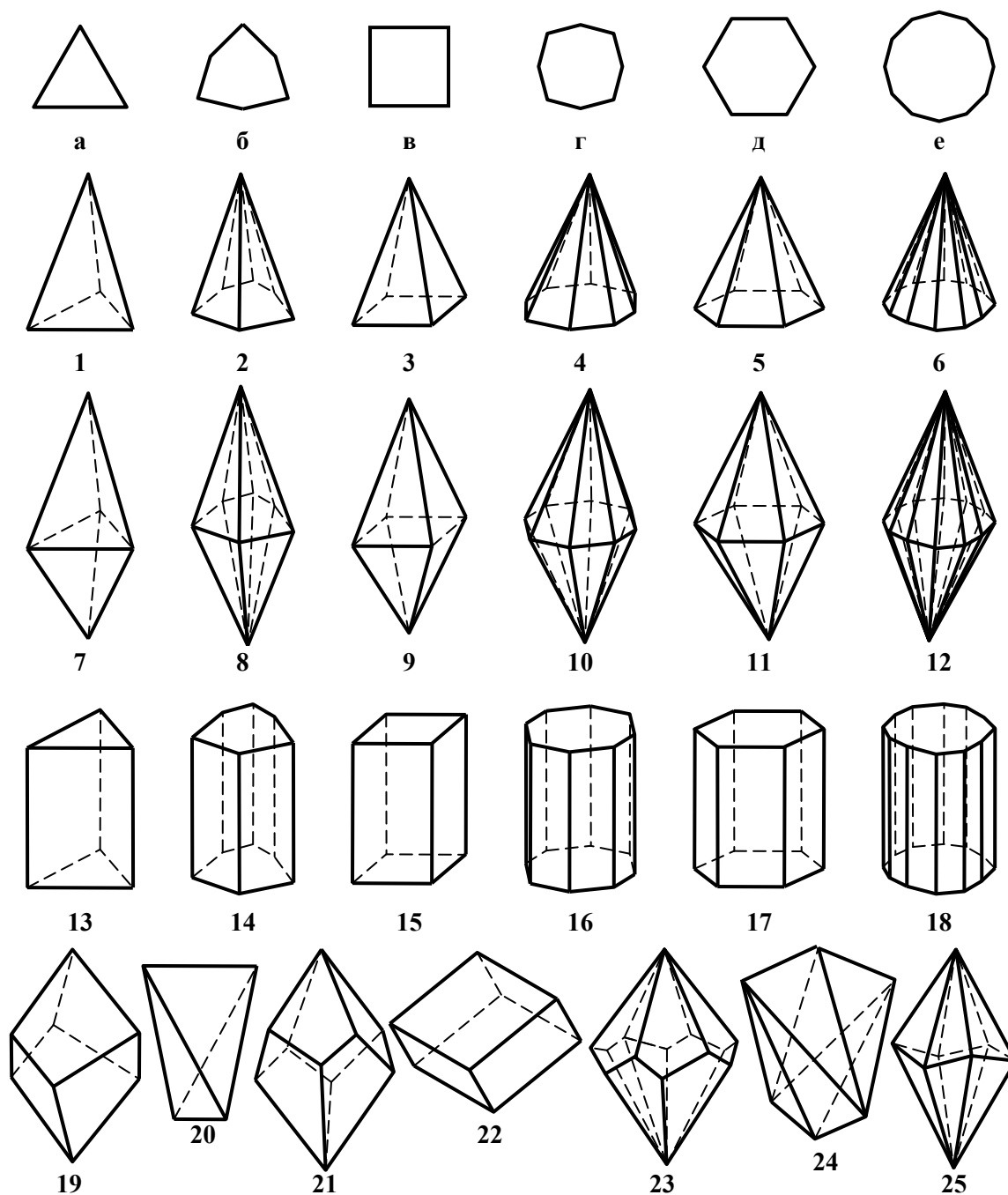


Рис. 35. Простые формы сингоний средней категории

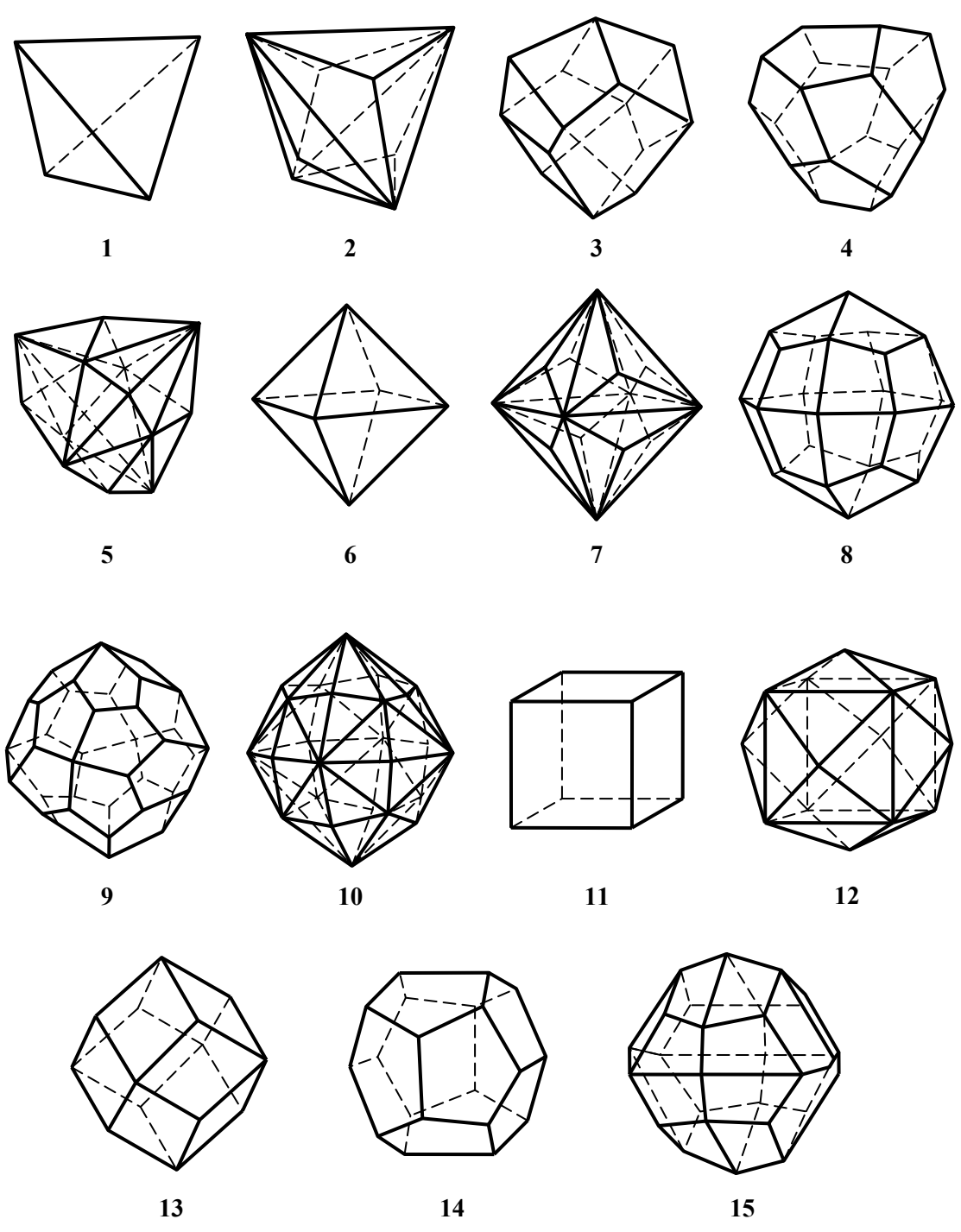


Рис. 36. Простые формы кубической сингонии высшей категории

## Простые формы

Категория	Сингонии	Номер формы на рисунке	Название простых форм по номенклатуре Федоровского института	Число граней
Низшая	<i>I. Простые формы низших сингоний</i>			
	Триклинная	1	Моноэдр	1
		2	Пинакоид	2
	Моноклинная	3	Диэдр	2
		4	Ромбическая призма	4
	Ромбическая	5	Ромбический тетраэдр	4
		6	Ромбическая пирамида	4
7		Ромбическая дипирамида	8	
Средняя	<i>II. Простые формы средних сингоний</i>			
	<i>1 Пирамиды</i>			
	Тригональная	1	Тригональная	3
		2	Дитригональная	6
	Тетрагональная	3	Тетрагональная	4
		4	Дитетрагональная	8
	Гексагональная	5	Гексагональная	6
		6	Дигексагональная	12
	<i>2 Дипирамиды</i>			
	Тригональная	7	Тригональная	6
		8	Дитригональная	12
	Тетрагональная	9	Тетрагональная	8
		10	Дитетрагональная	16
	Гексагональная	11	Гексагональная	12
		12	Дигексагональная	24
	<i>3 Призмы</i>			
	Тригональная	13	Тригональная	3
		14	Дитригональная	6
	Тетрагональная	15	Тетрагональная	4
		16	Дитетрагональная	8
	Гексагональная	17	Гексагональная	6
		18	Дигексагональная	12
	<i>4 Особые формы</i>			
	Тригональная	19	Тригональный трапецоэдр	6
	Тетрагональная	20	Тетрагональный тетраэдр	4
21		Тетрагональный трапецоэдр	8	
Тригональная	22	Ромбоэдр	6	
Гексагональная	23	Гексагональный трапецоэдр	12	
Тетрагональная	24	Тетрагональный скаленоэдр	8	
Тригональная	25	Тригональный скаленоэдр	6	
Высшая	<i>III. Простые формы кубической сингонии</i>			
	Кубическая	1	Тетраэдр	4
		2	Тригон тритетраэдр	12
		3	Тетрагон тритетраэдр	12
		4	Пентагон тритетраэдр	12
		5	Гексатетраэдр	24
		6	Октаэдр	8
		7	Тригон-триоктаэдр	24
		8	Тетрагон-триоктаэдр	24
		9	Пентагон-триоктаэдр	24
		10	Гексоктаэдр	48
		11	Гексаэдр	6
		12	Тетрагексаэдр	24
		13	Ромбододекаэдр	12
		14	Пентагон-додекаэдр	12
15		Дидодекаэдр	24	



## ЗАКОН ЦЕЛЫХ ЧИСЕЛ

## ОСИ И ПАРАМЕТРЫ ГРАНЕЙ

При характеристике многогранников, кроме элементов симметрии, нужно определять положение отдельных граней в пространстве и взаимное их расположение. С этой целью внутри многогранников условно проводят координатные оси, которые могут быть прямоугольными и косоугольными.

Координатные оси, проведенные параллельно рядам пространственной решетки, называются *кристаллографическими осями*. Обычно выделяют три кристаллографические оси, а четыре только в том случае, когда приходится иметь дело с кристаллами тригональной и гексагональной сингоний.

В прямоугольной системе координат (кристаллы кубической, тетрагональной и ромбической сингоний) имеются три оси: одна из них  $X$  направлена к наблюдателю, другая  $Y$  – справа налево, третья  $Z$  – располагается вертикально (рис. 37, а).

Концы осей, направленные к наблюдателю, вправо от центра и вверх, надо считать положительными, имеющими знак плюс (+), а направленные в противоположные стороны – минус (–) (рис. 37, а).

В зависимости от формы кристалла грани его могут занимать различное положение относительно кристаллографических осей.

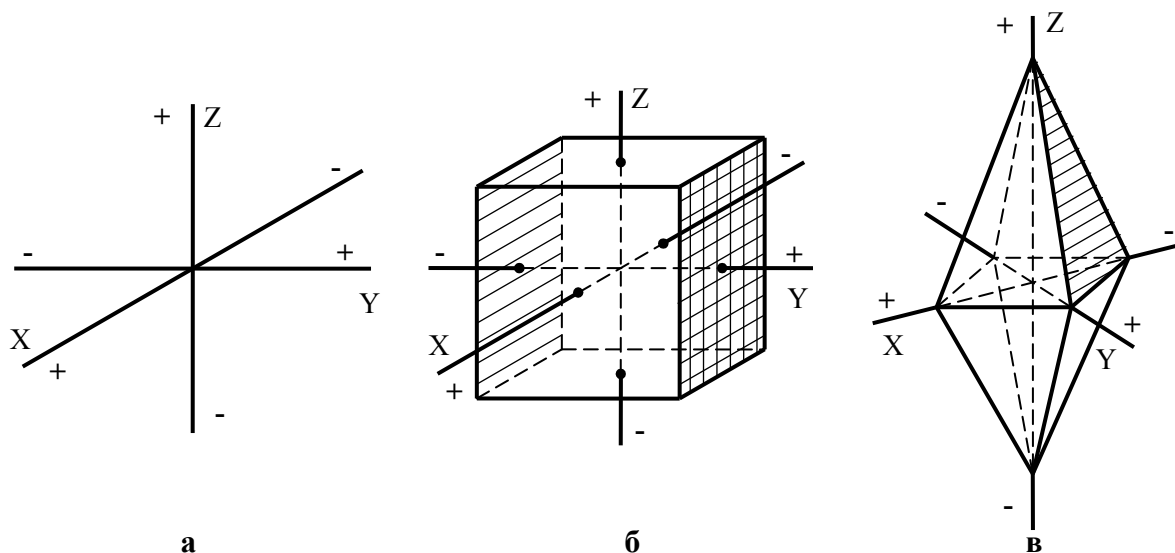


Рис. 37. Кристаллографические оси и их положение в кристаллах:  
а – система осей; б – положение осей в гексаэдре; в – положение осей в октаэдре

Грани могут пересекать одну, две и три оси, проходить параллельно осям (рис. 37, б). Заштрихованная грань гексаэдра (в полоску) на некотором расстоянии от центра пересекает ось  $Y$  – в левой отрицательной половине куба и параллельна осям  $X^+$  и  $Z^+$ . Заштрихованная грань гексаэдра (в клеточку) пересекает ось  $Y^+$  и параллельна  $X^+$ ;  $Z^+$  (рис. 37, б). Заштрихованная грань октаэдра пересекает оси  $Y^+$ ,  $Z^+$ ,  $X^-$  (рис. 37, в).

**Косоугольная система** координат характерна для моноклинной и тригональной сингоний.

Возьмем три ребра кристалла, пересекающихся в одной точке  $0$ . Точку  $0$  примем за начало координат. Оси  $X, Y, Z$  – координатные (кристаллографические), совпадающие с направлением непараллельных трех ребер кристалла. При выборе координатных осей в большинстве случаев достаточно трех осей (кристаллографических). Только для кристаллов тригональной и гексагональной сингоний выбираются четыре кристаллографические оси.

Затем берем 2 непараллельные грани:  $A_1B_1C_1$  и  $A_6B_4C_2$ . Грань  $A_1B_1C_1$  называется *единичной*, так как отсекает по одному линейному отрезку на каждой кристаллографической оси, называемой *осевыми единицами*. Последние получили постоянные обозначения:  $a$  – по оси  $X$ ,  $b$  – по оси  $Y$ ,  $c$  – по оси  $Z$  (рис. 38). Эти оси в других пособиях могут обозначаться через  $I, II$  и  $III$ , т.е. как  $X, Y$  и  $Z$ . Постоянные обозначения греческими буквами получили и углы (осевые):  $\alpha$  – угол между осями  $Y$  и  $Z$ ,  $\beta$  – угол между осями  $X$  и  $Z$  и  $\gamma$  – угол между осями  $X$  и  $Y$ .

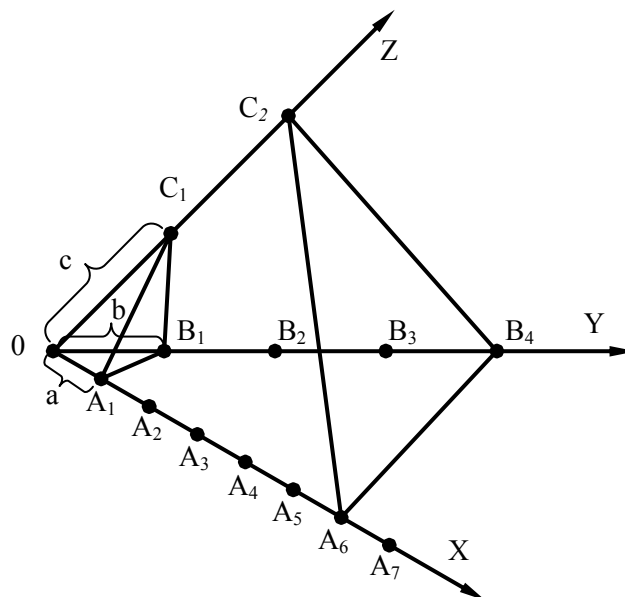


Рис. 38. Ребра  $0X, 0Y, 0Z$  – ряды решетки, грани  $a_1b_1c_1$  и  $a_6b_4c_2$  – плоские сетки

Для единичной грани отношение между отрезками всегда постоянно и равно  $a : b : c = 1 : 1 : 1$ . Вторая грань  $A_6B_4C_2$  отсекает отрезки в соотношении  $6a : 4b : 2c$ . Если разделим осевые единицы второй грани на осевые единицы первой и возьмем отношение между ними, то получим

$$\frac{a_6}{a} : \frac{b_4}{b} : \frac{c_2}{c} = 6 : 4 : 2.$$

Эти числа являются числовыми *параметрами грани* или в общем случае  $m : n : p$ . Их можно сократить и получим  $3 : 2 : 1$ . Числовые параметры в кристаллах представляют собой простые и рациональные числа (не более 5). Это *закон целых чисел*, или *закон рациональных отношений*. Сформулировал его на основании изучения многогранных форм природных кристаллов французский кристаллограф Р.Ж. Гаюи (1743–1822).

Закон гласит, что *положение всякой грани кристалла можно определить тремя целыми числами, если за оси координат выбрать направление трех ребер кристалла, а за единицы измерения – отрезки, отсекаемые на этих осях одной из граней кристалла*.

## ИНДЕКСЫ И СИМВОЛЫ ГРАНЕЙ

Закон целых чисел позволяет давать удобные обозначения для каждой грани кристалла. При этом сейчас берут не числовые параметры, как прежде, когда этот способ был применен впервые в 1818 г. Вейсом, а обратные им величины, предложенные Миллером в 1839 году. В нашем примере следует брать не числовые параметры  $6 : 4 : 2$ , а обратные им величины (предварительно сократив их на 2, получим  $3 : 2 : 1$ ):

$$\frac{1}{3} : \frac{1}{2} : \frac{1}{1},$$

т.е. три всегда правильные дроби, сохраняя их отношения. Затем приводим их к целым числам:

$$\frac{1}{3} : \frac{1}{2} : \frac{1}{1} = \frac{6}{3} : \frac{6}{2} : \frac{6}{1} = 2 : 3 : 6.$$

Эти три цифры будут называться *индексами грани*, если знак отношения (:) не ставится, а цифры заключены в круглые скобки (236) – они обозначают *символ грани*. Таким образом, символом грани называется совокупность трех

наименьших чисел, обратно пропорциональных числовым параметрам данной грани.

Когда грань пересекает отрицательную ось, например  $Y$ -, над соответствующим индексом ставится минус ( $2\bar{3}6$ ), читается два, минус три, шесть. Если грань параллельна одной или двум осям, ее вейсовские параметры по этим осям будут бесконечно велики ( $\infty$ ). В миллеровских символах это будет  $1/\infty = 0$ , что является признаком параллельности данной грани и соответствующей оси. Например, грань, символ которой  $(110)$ , будет параллельна оси  $Z$ , а символ грани, параллельной двум кристаллографическим осям, выражается единицей с двумя нулями  $(100)$  (рис. 36) и т.д.

Возьмем куб, для примера рассмотрим символы шести его граней, за оси принимаем направление трех его взаимно перпендикулярных ребер  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Следовательно,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$ . Единичная грань кубической решетки должна совпадать с пространственной диагональной плоскостью, перпендикулярной оси третьего порядка. Отношение осевых единиц будет  $a = b = c$ . Поместим начало координат в центре куба, получим следующие символы для его граней: для передней –  $(100)$ , задней –  $(\bar{1}00)$ , правой –  $(010)$ , левой –  $(0\bar{1}0)$ , верхней –  $(001)$ , нижней –  $(00\bar{1})$  (рис. 39). Куб можно в целом охарактеризовать символом *одной грани*, заключенной в *фигурные скобки*  $\{100\}$ . Символом простой формы – октаэдра – является символ грани  $\{111\}$ . Символ *единичной грани* (масштабной) всегда равен  $(111)$ .

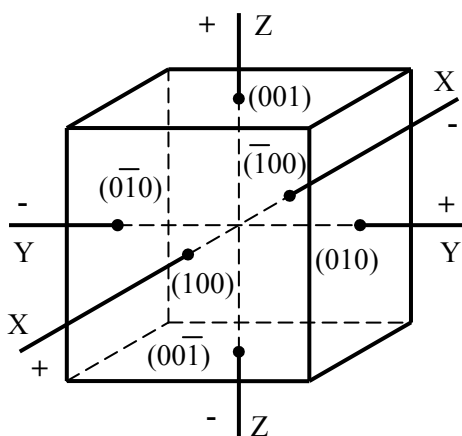


Рис. 39. Символы граней куба

Символы граней зависят от выбранной установки. Если изменить направления осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , какие были приняты, и взять за единичную грань иную, пересекающую все три кристаллографические оси, мы получим для всех граней

кристалла иные символы. Поэтому выбор координатных осей и единичной грани должен соответствовать определенным правилам.

Установка кристалла должна быть однозначной для данного кристалла. За оси координат обязательно принимают те направления, которые связаны с симметрией. Такими направлениями являются:

1. Оси симметрии.
2. Нормали к плоскостям симметрии.

При выборе установки придерживаются следующих двух общих правил:

1. Оси координат следует выбирать так, чтобы углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  были равны или, по возможности, близки к  $90^\circ$ .
2. Единичную грань надо выбирать так, чтобы отрезки, отсекаемые на осях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , при неравенстве  $a \neq b \neq c$  были примерно одинаковой длины.

Если среди имеющихся на кристалле нет ни одной грани, пересекающей все три кристаллографические оси, то берут две грани, пересекающие эти оси попарно, например  $X$  и  $Y$ ,  $Y$  и  $Z$ . По первой грани находят отношение  $a : b$ , по второй –  $b : c$ . Эти грани имеют символы  $(110)$  и  $(011)$  и называются двуединичными.

Рассмотрим установку кристаллов по сингониям.

#### ***Триклинная сингония***

Нет ни одного элемента симметрии, дающего стабильное направление, в этой сингонии (виды  $L_1$  и  $C$ ). За три оси координат приходится принимать направления трех ребер  $a \neq b \neq c$ , соблюдая условие, чтобы косые углы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  при их неравенстве  $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$  были по возможности близки к прямым углам (табл. 2).

#### ***Моноклиная сингония***

В видах этой сингонии присутствует только одна ось второго порядка или одна плоскость симметрии  $P$ . Ось  $L_2$  или нормаль к плоскости  $P$  всегда принимается за горизонтальную ось  $Y$ . В качестве двух других координатных осей  $X$  и  $Z$ , приходится использовать направления ребер. Эти направления служат тремя осями неравной длины ( $a \neq b \neq c$ ), углы выбирают так, чтобы они соответствовали условию  $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ,  $\beta \neq 90^\circ$  (табл. 2).

#### ***Ромбическая сингония***

В двух из трех ее видов симметрии имеются три взаимно перпендикулярные оси второго порядка, их принимают за оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . В третьем виде ( $L_22P$ ) ось второго порядка принимают за вертикальную ось ( $Z$ ), а нормали к  $2P$  являются соответственно осями  $X$  и  $Y$ . За единичную грань принимают одну из косых граней. Осевые и угловые координаты ромбической сингонии:  $a \neq b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ . Здесь три оси неравной длины пересекаются под прямыми углами.

Элементарная ячейка – кирпичик. Для ромбической сингонии характерна прямоугольная система координат.

### ***Тетрагональная сингония***

Во всех ее видах имеется одна ось высшего порядка  $L_4$ . Имеются оси  $L_2$ , перпендикулярные к оси четвертого порядка и плоскости симметрии, проходящие через эту ось. В тетрагональной сингонии три оси  $a = b \neq c$ .

Главную ось всегда принимают за вертикальную  $Z$ , две перпендикулярные к ней  $L_2$  – за оси  $X$  и  $Y$ . Если таковых нет, их заменяют нормали к двум взаимно перпендикулярным плоскостям, пересекающимся по оси  $Z$ . Или принимают за оси  $X$  и  $Y$  направления двух ребер, перпендикулярных друг к другу и к оси  $L_4$ , соблюдая правило  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .

### ***Тригональная и гексагональная сингонии***

Они всегда описываются вместе, поскольку элементы симметрии у них одинаковы (табл. 2). Для них за оси координат в кристаллографии принимают не три, а четыре оси. Особенность эта вызвана тем, что при установке на три оси грани одной и той же простой формы имеют индексы, различные не только по знаку и месту в символе, но и по самим цифрам, что весьма неудобно. В этих сингониях  $a = b \neq c$  и  $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$  (табл. 2).

За вертикальную главную ось, которая всегда обозначается буквой  $Z$ , всегда принимают единственную в каждом виде ось высшего порядка  $L_3$  или  $L_6$ . За три горизонтальные оси  $X, Y$  и  $V$  принимают три оси второго порядка, а если таковых нет – нормали к вертикальным плоскостям симметрии или соответствующие направления трех ребер. Ось  $Y$  всегда располагается справа налево, она и остается на прежней позиции. Оси  $X$  и  $V$  обе направлены к наблюдателю: ось  $X$  – влево, ось  $\bar{V}$  – вправо, которая будет находиться между осью  $X$  и  $Y$  с отрицательным концом. Положительные и отрицательные направления при этом положении осей будут чередоваться, кроме этого, при установке на четыре оси единичная грань имеет символ, отличающийся от обычного (111). Поскольку в тригональной и гексагональной сингонии  $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ$  и  $\gamma = 120^\circ$  (табл. 2), а оси  $X, Y, V$  расположены в одной горизонтальной плоскости, единичная грань не может пересекать все эти три оси на одинаковых расстояниях от начала координат. Она может давать равные отрезки либо на двух соседних осях, например  $X$  и  $V$ , либо на двух несмежных, например на осях  $X$  и  $Y$ .

В первом случае единичная грань параллельна третьей горизонтальной оси  $\bar{Z}$ , и ее символом будет  $(10\bar{1}1)$ ; во втором случае она пересекает третью ось  $Z$  на расстоянии, в два раза меньшем, т.е. символом ее будет  $(\bar{1}\bar{1}\bar{2}1)$ .

### ***Кубическая сингония***

В кубической сингонии во всех ее видах имеются три взаимно-перпендикулярные оси – либо  $3L_4$ , либо  $3L_2$ . Они всегда могут быть приняты за оси X, Y, Z. Причем безразлично, какую из них принимать за вертикальную, какую проводить справа налево и к наблюдателю, поскольку эти оси при повороте вокруг оси  $L_4$  или  $L_2$  меняются местами, таким образом  $a = b = c$  и углы  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  (табл. 2). Отсюда получается, что в кубической сингонии установка однозначная, все плоскости можно считать единичными.

Таблица 4

### ***Правила кристаллографической установки и выбора единичной грани***

<b><i>Сингония</i></b>	<b><i>Выбор координатных осей</i></b>	<b><i>Выбор единичной грани</i></b>
Триклинная	Три действительных или возможных ребра кристалла принимают за оси X, Y и Z	Грани пинакоида или моноэдра
Моноклинная	Ось Y – ось второго порядка $L_2$ или нормаль к плоскости P. За X и Z – два действительных или возможных ребра, лежащих в плоскости симметрии или в плоскости, нормальной к оси симметрии – Y или одна $L_2$ – ось Z	Грани ромбической призмы или диэдра
Ромбическая	Три оси второго порядка $L_2$ или одна $L_2$ и две нормали к плоскостям симметрии за X, Y	Грани ромбической пирамиды, дипирамиды или тетраэдра
Тетрагональная	Ось Z – ось четвертого порядка $L_4$ перпендикулярна плоскости XY. Оси X, Y – две оси второго порядка $L_2$ или нормали к плоскостям P, или два действительных или возможных ребра	Грани ромбической пирамиды, дипирамиды или тетраэдра
Тригональная и гексагональная (обе сингонии соединены, так как имеют одинаковую установку)	Ось Z – ось третьего $L_3$ или шестого порядков $L_6$ , перпендикулярная плоскости XY. Оси X, Y, V – три оси второго порядка $L_2$ или нормали к плоскостям P, или три ребра под углами $60^\circ$	Грани пирамиды, дипирамиды или тетраэдра
Кубическая	Три взаимно перпендикулярные оси четвертого порядка $3L_4$ или 3 оси второго порядка $3L_2$ . Из них любую можно принять за оси X, Y, Z	Грань октаэдра или тетраэдра

## ФОРМЫ РЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В природных условиях наиболее часто встречаются не одиночные кристаллы, а параллельные сростки и двойники, относящиеся к закономерным сросткам, и незакономерные сростки в виде различных агрегатов (скоплений) из хаотически расположенных кристаллических зерен (горные породы – гранит, мрамор и мн. др.).

**Параллельные сростки** образуются в процессе роста, когда несколько многогранников, находящихся в кристаллизационной среде, соприкоснувшись друг с другом, стали расти вместе. При этом может иметь место небольшое отступление от параллельности (рис. 40, 41).



Рис. 40. Кристаллы дымчатого кварца в параллельных сростках



Рис. 41. Кристаллы мориона в параллельных сростках

**Двойники** представляют собой закономерные сростки двух или более кристаллических индивидов, связанных осевой или зеркальной симметрией.

Когда один кристалл выводится из другого поворотом на  $180^\circ$  вокруг оси, она называется **двойниковой осью**, а если один кристалл как бы является зеркальным отражением другого, плоскость отражения называется **двойниковой плоскостью**. Граница сросшихся кристаллов в двойнике, называется поверхностью срастания – **двойниковым швом**. Двойник гипса – «ласточкин хвост» – обладает одновременно и двойниковой осью, и двойниковой плоскостью (рис. 42).

Двойниковая ось отвечает возможному ребру или перпендикуляру к возможной грани в кристаллическом сростке, а двойниковая плоскость – плоской сетке, т.е. возможной грани.

Двойники разделяются на двойники **срастания** и **двойники прорастания**. Двойники срастания (**контактные**) **индивидов** располагаются по разные



стороны от плоскости срастания. Например, двойник срастания кристаллов альбита (рис. 43). Двойниками срастания являются *полисинтетические* двойники: плоскости срастания их параллельны друг другу, а индивиды имеют пластинчатую форму (плаггиоклазы) (рис. 45).

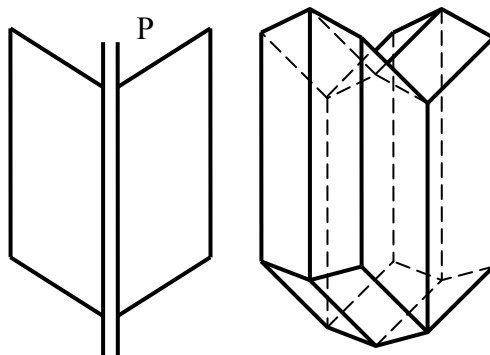


Рис. 42. Двойники гипса

В случаях срастания трех, четырех кристаллов и более различают соответственно тройники, четверники (рис. 44), когда очень много – полисинтетические двойники (рис. 45).

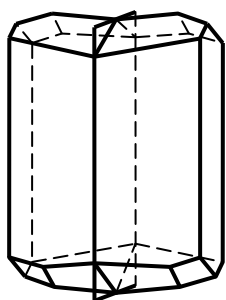


Рис. 43. Двойники альбита.  
Альбитовый закон  
двойникования

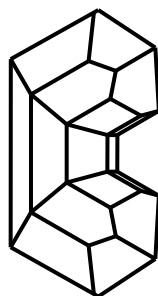


Рис. 44. Тройник  
касситерита

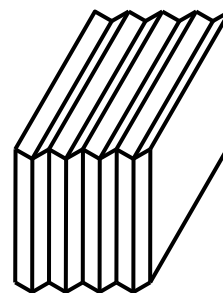


Рис. 45. Полисинте-  
тический двойник

**Двойники прорастания** (проникновения): один из кристаллов двойника насквозь прорастает другим (рис. 46).

Обе группы двойников – срастания и прорастания – образуются в процессе роста кристаллов.

Для каждого класса симметрии существуют свои типы двойникования.

Двойники пирита образуют железный крест и др. формы. Флюорит образует двойники прорастания (рис. 46). Минерал ставролита получил свое название за крестообразную форму двойников (от греч. «σταυρος» – «крест» и «λίθος» – «камень»). Кресты бывают прямые (рис. 47, а) и косые (рис. 47, б).

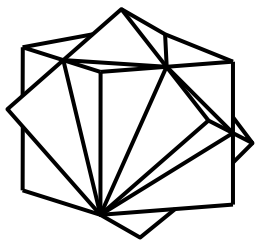


Рис. 46. Двойник прорастания плавикового шпата (флюорита)

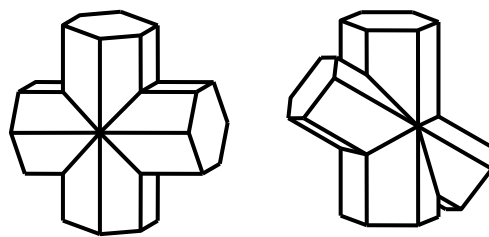


Рис. 47. Двойник прорастания ставролита

Существуют законы двойникования для ряда минералов, которые описываются в более крупных изданиях.

Большим многообразием форм отличаются незакономерные срастания – агрегаты (горные породы – гранит, мрамор). Сюда же относятся друзы (щетки) многих сросшихся кристаллов минералов, имеющих общее основание, для примера отметим горный хрусталь (рис. 48), кристаллы кальцита (рис. 49). Друзы в природе характерны для многих минералов.

Кубы и ромбоэдры нередко принимают седловидную форму (рис. 50). Встречаются и скрученные формы (рис. 51).



Рис. 48. Друза кристаллов кварца



Рис. 49. Друза кристаллов кальцита

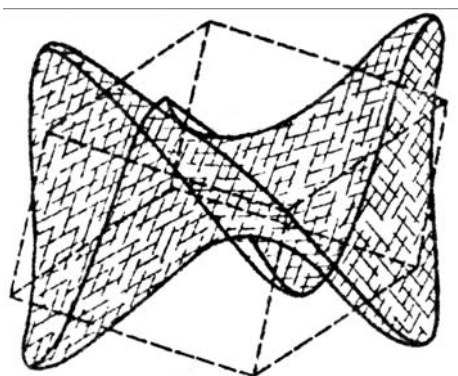


Рис. 50. Деформированный кристалл сидерита

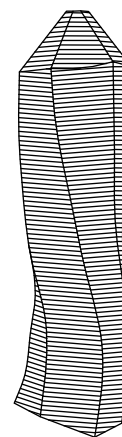


Рис. 51. Скрученный кристалл кварца

У кристаллов следует отметить расщепленные формы – сферолиты, конкреции, секреции, оолиты, дендриты и кристаллические снежинки.

**Сферолиты** – встречаются в виде сферических или эллипсоидальных тел различного размера, образованных тонкими, расходящимися из центра волокнами. Скопления сферолитов образуют оолитовые агрегаты. В сферолитах встречаются многие минералы: карбонаты – сидерит, некоторые силикаты-слюды и др. Малахит из карбонатов встречается в сферокристаллах и сферолитах.

По мнению Кантора (1986), сферолиты получаются, когда расщепление кристалла идет весьма интенсивно, иногда до тончайших волокон. Сферолиты – наиболее распространенная форма расщепления многих минералов (например, апатит-фосфарит – рис. 52). Дислокации разбивают структуру на отдельные блоки, что придает индивиду некоторое сходство с минеральным агрегатом. Когда расщепление кристалла идет с обоих концов, образуется сноповидный сrostок (рис. 53).



Рис. 52. Апатит-фосфорит (разрез)

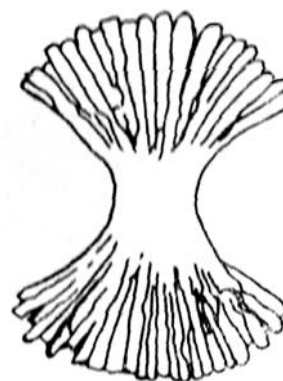


Рис. 53. Сноповидный сферолит

### **Конкреции и секреции**

**Конкреции** – округлые образования, возникшие из-за постепенного нарастания минералов от центра к периферии (рис. 54, а).

Мелкие конкреции с ясно выраженным концентрическим строением называются **оолитами** – горошинами (рис. 54, в).

Секреции образуются в пустотах, заполнение их минералом происходит от стенок к центру (рис. 54, б). Крупные секреции называются **жеодами**.

### **Дендриты и кристаллические снежинки**

На поверхности минералов и пород часто образуются своеобразные древовидные (дендритовые) поликристаллические агрегаты – показатель

быстрой кристаллизации. Это усложненные формы роста – дендриты (рис. 55), сюда же относятся и кристаллические скелеты. Классическим примером кристаллических скелетов служат снежинки (рис. 56).

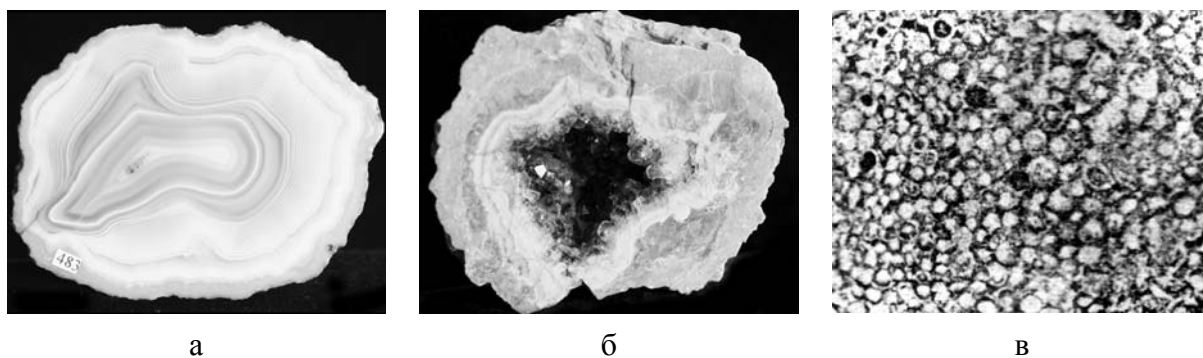


Рис. 54. Конкреция и секреция: а – конкреция, в центре – кварцевая песчинка; б – секреция, в центральной части – полость, ограниченная мелкими кристаллами кварца; в – оолиты – горошины (арAGONит), иногда в виде просяного зернышка

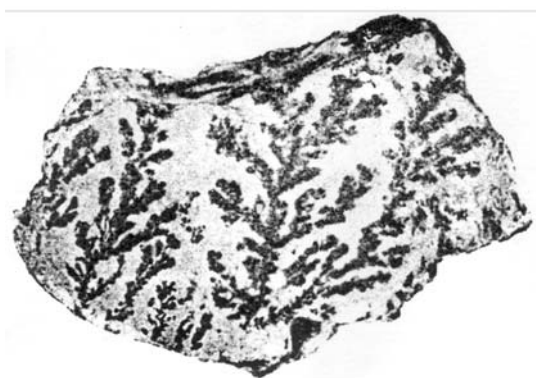


Рис. 55. Дендриты окислов марганца



Рис. 56. Снежинка

## СВЕДЕНИЯ О СТРУКТУРАХ КРИСТАЛЛОВ

Впервые математически обоснованное представление о закономерностях внутреннего строения кристаллов дал О. Бравэ (1811–1863). Ему принадлежит создание теории пространственных решеток, названных решетками Бравэ. Используя основные свойства кристаллического вещества – однородность и анизотропность, он вывел 14 типов пространственных решеток, различающихся по форме и симметрии элементарных ячеек. Решетки Бравэ играют очень важную роль в кристаллографии. Любую кристаллическую структуру можно представить с помощью одной из 14 решеток Бравэ.

По характеру взаимного расположения основных трансляций или по расположению узлов все кристаллические решетки, по Бравэ, разделяются на четыре типа (рис. 57):

- примитивные P;
- базоцентрированные – ячейка обозначается C, B или A. Иногда C-ячейку называют базоцентрированной, A и B – бокоцентрированной;
- объемно-центрированные I;
- гранецентрированные F.

В примитивной решетке P узлы располагаются только по вершинам ячейки, а в сложных ячейках имеются еще узлы.

В объемно-центрированной решетке I – один узел в центре ячейки, в гранецентрированной F – по одному узлу в центре каждой грани, в базоцентрированной C, A, B – по одному узлу в центрах пары параллельных граней.

Примитивные ячейки Бравэ – это те основные ячейки, по которым были выделены сингонии. Выделяют, как известно, триклинную, моноклинную, ромбическую, тригональную, тетрагональную, гексагональную, кубическую сингонии. Распределение 14 решеток Бравэ по сингониям приведено на рис. 57.

Большой вклад в разработку теории внутреннего строения кристаллического вещества внес великий русский ученый, гениальный кристаллограф и геометр Е.С. Федоров (1853–1919). Задолго до открытия рентгеноанализа, Е.С. Федоров, занимаясь геометрией правильных систем точек, пришел к выводу, что правильные системы точек являются *пространственными группами*. Общее число пространственных групп – 230. Эти совокупности образуют структуры кристаллов. Это пространственные группы Федорова.

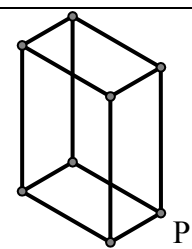
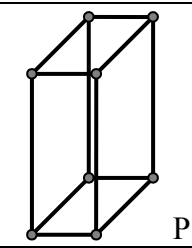
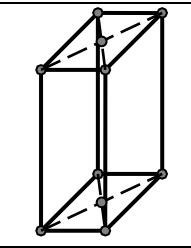
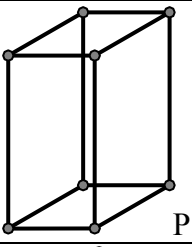
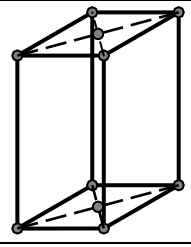
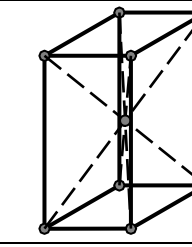
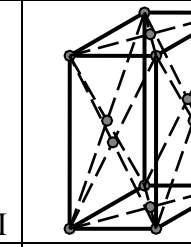
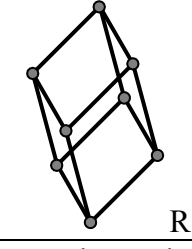
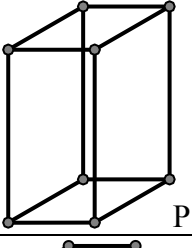
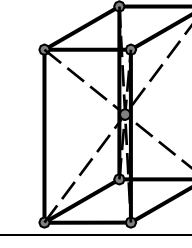
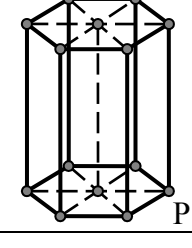
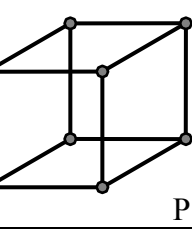
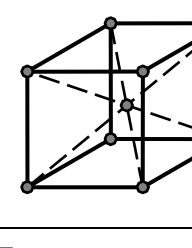
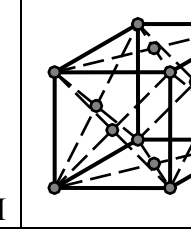
Сингония	Тип решетки			
	Примитивная	Базо-центрированная	Объемно-центрированная	Гране-центрированная
Триклинная	 P			
Моноклинная	 P	 C		
Ромбическая	 P	 C	 I	 F
Тригональная (ромбоэдрическая)	 R			
Тетрагональная	 P		 I	
Гексагональная	 P			
Кубическая	 P		 I	 F

Рис. 57. 14 решеток Бравэ

Из этого следует, что между правильными системами точек и пространственными группами существует прямая, закономерная связь, так как точки связаны симметрическими преобразованиями последних.

**Правильные системы точек** – это совокупности симметрично эквивалентных позиций (точек), связанных между собой симметричными преобразованиями пространственной группы.

Правильная система точек характеризует геометрические законы пространственного расположения структурных единиц в кристалле – атомов и ионов. Понятие правильной системы точек для пространственной группы играет такую же роль, как понятие простой формы для точечной группы.

**Пространственные группы симметрии** – совокупность всех возможных элементов симметрии кристаллической структуры.

Пространственная группа симметрии характеризует симметрию структуры кристалла, аналогично тому, как точечная группа симметрии характеризует симметрию внешней формы кристалла и его физических свойств.

По сингониям группы распределились следующим образом:

Триклинная сингония	– 2	Тетрагональная сингония	– 68
Моноклинная сингония	– 13	Гексагональная сингония	– 27
Ромбическая сингония	– 59	Кубическая сингония	– 36
Тригональная сингония	– 25	Итого	– 230

Теоретический вывод 230 законов симметрии расположения частиц в кристаллах блестяще подтвердился последующими исследованиями с применением рентгеновских лучей для выяснения структуры кристаллических веществ.

Важнейшими типами пространственных решеток, по Федорову, являются следующие: **кубическая примитивная, кубическая гранецентрированная, кубическая объемно-центрированная, гексагональная примитивная** (рис. 58).

Эти идеальные решетки для него были исходными, все остальные, менее симметричные, могут быть получены из них путем растяжений и сдвигов. Е.С. Федоровым был выведен **закон кристаллографических пределов, согласно которому весь мир кристаллов можно подразделить на два типа – кубический и гексагональный** (рис. 58). Например, моноклинные слюды по форме кристаллов близки к правильным шестиугольникам, моноклинные пироксены при раскалывании образуют обломки с углами, почти равными 90°, роговые обманки имеют спайность в двух направлениях под углом, близким к 120°.

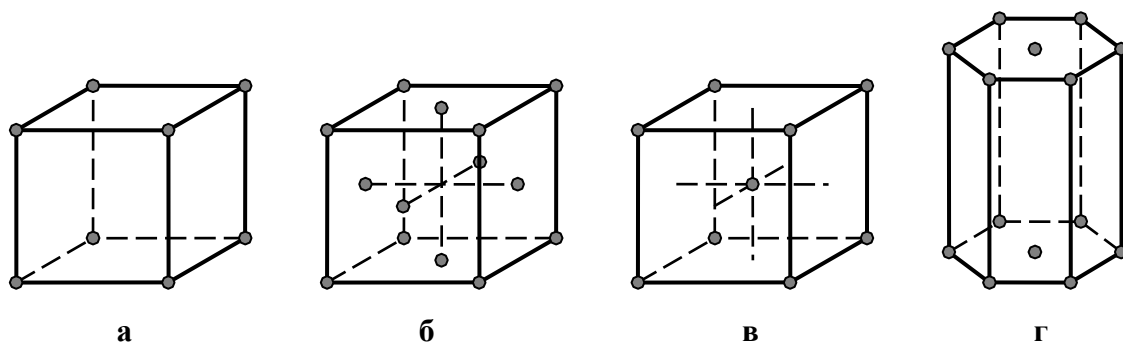


Рис. 58. Типы решеток по Федорову: а – кубическая примитивная, б – кубическая гранецентрированная, в – кубическая объемно-центрированная, г – гексагональная примитивная

Ромбический барит, раскалываясь по спайности, образует выколки, напоминающие по форме кубики. Отсюда вывод – роговые обманки и слюды близки к гексагональному типу, а пироксены и барит – к кубическому типу.

Схематически внутреннюю структуру кристаллов в настоящее время можно моделировать конкретно с помощью кристаллической решетки.

Ниже приведем для примера кристаллические решетки (структуры) некоторых минералов (рис. 59) и рассмотрим вопрос о взаимосвязи элементарных частиц (атомов, ионов) в структурах кристаллов с физическими и химическими свойствами.

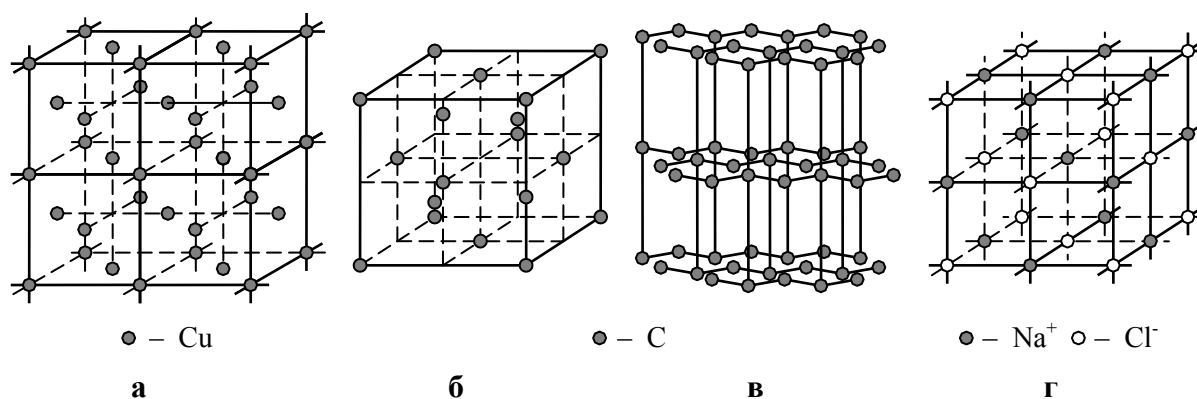


Рис. 59. Кристаллические решетки: а – меди; б – алмаза; в – графита; г – галита

## СВЕДЕНИЯ О КРИСТАЛЛОХИМИИ

Кристаллохимия как наука изучает пространственное расположение (атомное строение) и связь атомов в кристаллах в тесной взаимосвязи с физическими и химическими свойствами. Она возникла в конце XIX – начале XX веков.



Систематические исследования структур кристаллов начались с 1913 года, после открытия рентгеновского анализа. Из всех разделов кристаллографии кристаллохимия – самая молодая наука. Благодаря попыткам связать внешнюю форму кристаллов с их внутренним строением и химическим составом, в начале XIX века были открыты явления полиморфизма и изоморфизма.

Но помимо этих очень важных открытий было установлено, что в кристаллах неорганических веществ нет обособленных групп атомов, называемых молекулами, и понятие обычной валентности к кристаллам неприменимо. Для описания таких структур было предложено использовать координационное число – это число атомов (ионов) одного элемента, окружающих атом другого в кристалле. Для примера приведем структуру каменной соли галита NaCl, в которой каждый ион натрия  $\text{Na}^+$  окружен шестью ионами хлора Cl<sup>-</sup>, а каждый ион хлора – шестью ионами натрия (рис. 56, г); каждый атом углерода C окружен четырьмя атомами углерода у алмаза (рис. 56, б); у графита каждый атом углерода окружен тремя атомами углерода (рис. 56, в); в элементарной ячейке меди Cu содержится 12 атомов – координационное число 12. Все обозначенные числа являются координационными числами: Na – 6, Cl – 6, алмаз – 4, графит – 3, медь – 12 и т.д.

Для металлов характерны наиболее высокие координационные числа: 12 (медь, золото, серебро) или 8 ( $\alpha$ -железо), для структуры сульфидов, хлоридов, фторидов – бескислородных кислот и кислородных – сульфаты, карбонаты и т.д. – характерны средние координационные числа, чаще всего – шесть, реже – семь и восемь.

Координационные числа играют большую роль при решении вопросов получения новых кристаллических веществ с заданными свойствами, выяснения устойчивости соединений, классификации химических соединений и др. Координационные числа влияют на решение проблем определения расположения атомов в кристаллических структурах.

Были рассчитаны размеры атомных и ионных радиусов, определены межатомные расстояния, плотнейшие упаковки частиц: выделены два типа простейших упаковок, заполняющих пространство на 74%, – они получили название простейших кубической и гексагональной упаковок.

По мнению русского ученого академика Н.В. Белова, внесшего большой вклад в кристаллохимию, такие упаковки составляют основу строения большинства представителей минерального мира. Практика свидетельствует, что значительная часть существующих в природе упаковок является либо простыми кубическими, либо гексагональными. Кроме этого, были установлены физико-химические типы связей в кристаллических структурах и мн. др.

Успехи кристаллохимии стали возможны благодаря современному развитию рентгеноструктурного анализа, позволяющего устанавливать внутреннее строение кристаллического вещества, учению о симметрии кристаллов и совершенствованию физико-химических методов исследования.

На основе изучения структур и физико-химических особенностей кристаллических веществ решаются вопросы получения новых кристаллических тел с заданными свойствами, проблемы, связанные с поисками полезных ископаемых, рациональной классификацией природных (минералов) и искусственных химических веществ.

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ТИПЫ СВЯЗЕЙ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

Атомы или ионы являются основными единицами структуры кристалла, и они же являются носителями электрических зарядов.

Среди атомов выделяют катионы и анионы.

Если атом отдал один или несколько своих электронов, он называется катионом и его обозначают положительным индексом (например,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ); атом, присоединивший к себе один или несколько электронов дополнительно, называют анионом и ставят отрицательный индекс ( $\text{S}^{2-}$ ).

Любой атом или ион способен образовывать тесную группировку с другими атомами или ионами, которая представляет собой одно целое, например  $(\text{CO}_3)^{2-}$ , ее называют радикалом.

Атом представляет собой очень маленькое положительно заряженное ядро, которое окружено одной или несколькими электронными оболочками, составляющими в целом подобие сферы с эффективным радиусом порядка  $1\text{ \AA}$ . Радиус зависит от природы химического элемента, от степени его ионизации и взаимосвязи с соседними атомами или ионами, особенно близко расположенными (на расстояниях, не превышающих первые  $\text{ \AA}$ ), называемыми химическими связями.

При изучении кристаллических структур кристаллов выделяют химические связи четырех типов, имеющих важное значение: металлическая; ковалентная (гомополярная); ионная (гетерополярная или полярная); Ван-дер-Ваальсовая (остаточная).

Заметим, что перечисленные типы связи не исключают одна другую в каждом конкретном случае, в частности во многих минералах и других неорганических кристаллических веществах может осуществляться одновременно более одного типа связи.

## МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

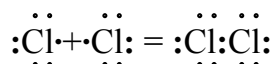
Благодаря этому типу связи в природе существуют твердые металлы, состоящие из элементов, атомы которых способны легко отдавать свои внешние электроны. Осуществляется металлическая связь (например, меди, золота и др.) взаимодействием свободных электронов и положительно заряженных атомных ядер. Металлический кристалл можно представлять как решетку из положительно заряженных атомных ядер, погруженных в свободные отрицательно заряженные электроны. У каждого атома может отщепиться несколько свободных электронов, и все они обобществляются. Эти электроны, слабо связанные, обычно рассеяны в пространстве между атомами и подвижны (электронные «облака»). Этой подвижностью обусловлены цвет, металлический блеск, ковкость, а также высокая электрическая проводимость и теплопроводность металлов. Металлическая связь имеет место в самородных металлах и некоторых сульфидах и др.

Кристаллическая структура металлов определяется упаковкой положительно заряженных атомов и их максимально возможным количеством, а электроны в построении структуры не принимают участия. Выделяют у металлов *плотнейшую кубическую* и *плотнейшую гексагональную упаковки*. Первая представляет собой правильное периодическое распределение атомов в виде гранецентрированной кубической элементарной ячейки, а вторая – гексагональная – примитивную гексагональную ячейку с двумя атомами на одну элементарную ячейку. Структура металлов отличается, кроме всего, наибольшими координационными числами. 12 или 8 – это числа атомов в атомных структурах или ионов противоположного знака в ионных структурах, располагающихся в ближайшем окружении соответственно данному атому или иону.

## КОВАЛЕНТНАЯ СВЯЗЬ

Ковалентная (гомеополярная), ее еще называют неметаллическим типом связи, является наиболее устойчивой в том случае, если атом имеет внешнюю электронную оболочку, полностью заполненную электронами. Это будет конфигурация атомов инертных газов, для которых характерно почти полное отсутствие способности к химическим реакциям. Эта связь редка (в своем чистом виде) у минералов. Но она, например, ярко проявлена у алмаза с

типичной ковалентной связью, где каждый атом углерода окружен четырьмя другими атомами углерода; каждый этот мотив повторяется во всей структуре и каждый кристалл представляет собой единую гигантскую молекулу. Другой пример: каждый из атомов хлора имеет по семь внешних электронов, и стабильная восьмиэлектронная конфигурация достигается за счет того, что оба атома обобщают по одному своему электрону (образуется общая «электронная пара», или «электронные мостики»):



За счет пары обобщенных электронов двух соседних атомов и осуществляется этот тип связи.

Ковалентная связь является направленной связью. Для ковалентных кристаллов характерны малые координационные числа, нет плотнейших упаковок, сильная температурная зависимость ширины запрещенной зоны – сферы действия атома или иона, внутрь которого никакие другие частицы проникать не могут. Существенное влияние примесей и температуры на проводимость, высокие значения твердости, температуры плавления. Ковалентная связь – признак полупроводниковых кристаллов. Величина электропроводности ковалентных кристаллов меняется в очень широких пределах: от хороших изоляторов до хороших проводников.

## ИОННАЯ СВЯЗЬ

Ионная связь характерна для неорганических соединений и поэтому играет чрезвычайно важную роль в структурах минералов. Действительно, практически все минералы, за исключением самородных элементов и сульфидов, представляют собой преимущественно ионные соединения. Ионная связь (например, хлористого натрия NaCl) осуществляется силами электростатического взаимодействия между положительными  $\text{Na}^+$  и отрицательными ионами  $\text{Cl}^-$ , которые образуются из-за избытка или недостатка электронов у атома. Эти разноименные ионы притягиваются электростатически и между ними возникает ионная связь. Этот тип связи является наиболее распространенным в кристаллах, представляющих ионные соединения. Связь эта заметнее, чем у металлов. В этом типе связи каждый ион окружен максимальным количеством ионов противоположного заряда. Только благодаря этому здесь характерны средние и сравнительно большие координационные числа (6 и 8), стремление к плотнейшим

упаковкам. Сюда относятся большинство диэлектриков (например, NaCl, CaF<sub>2</sub> и др.). Электропроводность ионных кристаллов на двадцать порядков выше, чем у металлов, они хрупки, отличаются средней плотностью, низкой теплопроводностью и др.

Помимо структур с простыми ионными связями (ионы отдельных химических элементов), широко распространены структуры со сложными ионами, состоящими из нескольких элементов. Сюда можно отнести *радикал* – ионный структурный подтип [OH]<sup>1-</sup>, [SO<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>, [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> и т.д.

## СВЯЗЬ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

Эту связь иногда называют остаточной, или межмолекулярной; она характерна для кристаллографических структур, образуемых затвердевшими (замороженными) инертными газами (гелием, аргоном, неоном и т.д.). У этих газов целиком заполнены внешние электронные оболочки, и поэтому они неспособны к образованию связей металлического, ковалентного или ионного типа. Силы, которые должны действовать между такими атомами, обычно называют *связями, силами* или *притяжением Ван-дер-Ваальса*. Силы эти весьма слабы.

Эти связи играют сравнительно небольшую роль в минералах, которая сводится главным образом к некоторому ослаблению прочности структур отдельных минералов.

В одном и том же соединении могут совместно присутствовать связи более чем одного типа. Например, у серы ковалентная связь совместима с Ван-дер-Ваальсовской, образуя единый кристалл.

Между пакетами структуры каолинита, монтмориллонита и др. глинистых минералов связь Ван-дер-Ваальсовская, а внутри пакетов – ионная.

## ИЗОМОРФИЗМ

Изоморфизм (от греч. «ίσος» – «равный» и «μορφή» – «форма», равноформность) был открыт в 1819 году Э. Митчерлихом (1794–1863).

*Изоморфизм* – это свойство химически и геометрически близких атомов, ионов и их сочетаний замещать друг друга в кристаллической решетке, образуя кристаллы переменного химического состава, но сходных одинаковыми кристаллическими формами.

Явление изоморфизма широко распространено в природе. Только развитием изоморфных замещений объясняется сложный химический состав большинства минералов, особенно из класса «Силикаты». Установлено, что значительная часть иттрия Y и редких земель – лантаноидов находится в апатите, сфене, флюорите, изоморфно замещая Ca, селен Se замещает серу в пирите FeS<sub>2</sub>. Следовательно, изоморфизм играет важную роль в миграции элементов в земной коре, особенно редких и рассеянных. В физической химии понятие изоморфизм заменяется понятиями «твердый раствор» и «изоморфные смеси». Они как синонимы, но в действительности не вполне тождественны (Ларионов, 1968).

Явление твердого раствора связано с возможностью размещения кристаллической решетки растворенного вещества в растворителе без нарушения решетки последнего. Это возможно в минералах, когда структурные элементы (атомы, ионы и др.) по своим размерам отвечают промежуткам решетки растворителя.

Изоморфные смеси – особый случай твердых растворов. Их компоненты имеют близкие структуры, вследствие чего замещение происходит в узлах общей решетки. Известны изоморфные ряды минералов: ряд плагиоклазов (альбит-анортит) и др.

Изоморфные смеси по Ларионову (1968) являются частным случаем твердых растворов, при котором растворитель и растворимое имеют в чистом виде аналогичное химическое строение и близкие кристаллографические формы, содержание растворенного вещества колеблется в широких пределах. Выделяют два основных вида изоморфизма: совершенный и несовершенный.

**Совершенный изоморфизм** – замещение одних частей другими происходит в любых количественных соотношениях с образованием непрерывного ряда промежуточных соединений от 100% одного вещества до 100% другого, между ними теряется разница. Образуются смешанные кристаллы (твердые растворы) с единой внешней формой.

Совершенный изоморфизм характеризуется 2 типами:

- а) **изовалентный** (одновалентный);
- б) **гетеровалентный** (разновалентный).

При изовалентном изоморфизме в кристаллической решетке один атом или ион одного вещества замещается одним атомом (ионом) другого вещества. Для замещения атома другим необходимо, чтобы один и тот же ионный или атомный радиус или их ионные радиусы не отличались один от другого более чем на 5–7%. Например, в магнезите MgCO<sub>3</sub> ион магния Mg может замещаться ионом железа

$\text{Fe}^{2+}$  вплоть до чистого сидерита  $\text{FeCO}_3$ . Здесь кристаллическая решетка допускает замену одних ионов другими без изменения своей основной формы. Общая формула будет  $(\text{Mg,Fe})[\text{CO}_3]_2$ . Запятая в скобках означает, что оба элемента замещают друг друга, тот элемент, которого больше, ставится на первое место. В минералах, особенно в силикатах, изоморфные замещения бывают очень сложными. Примером может служить гетеровалентный изоморфизм.

При гетеровалентном (разновалентном) изоморфизме происходит замещение одной группы ионов с разными валентностями, но одинаковой суммарной валентностью.

Например, плагиоклазы образуются при взаимном растворении двух самостоятельных минералов: альбита  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  и анортита  $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ , которые образуют непрерывный ряд совершенного изоморфизма. Замещение идет здесь группами, так как смешиваются друг с другом в любых пропорциях, от 100% одного до 100% другого ( $\text{Ca}^{2+}\text{Al}^{3+}$  на  $\text{Na}^{1+}\text{Si}^{4+}$ ), сравнимыми друг с другом суммами валентностей (зарядов) –  $2^+ + 3^+ = 1^+ + 4^+$ . Этот непрерывный изоморфный ряд новообразованных минералов – **плагиоклазов** – в зависимости от содержания альбитовой и анортитовой частей имеет название, **номер плагиоклаза** и подразделяется на **кислые**, **средние** и **основные плагиоклазы** (табл. 5).

Это пример совершенного изоморфизма, когда растворение (замещение) на глубине может происходить в широком диапазоне температур и давлений.

К настоящему времени в природе выявлено довольно большое количество изоморфных групп минералов или отдельных пар минералов.

Наибольшее значение имеют изоморфные соединения силикатных минералов: кроме указанных выше плагиоклазов – оливин, амфиболы, пироксены.

Таблица 5

**Деление плагиоклазов по группам**

<b>Название минерала</b>	<b>Содержание альбита Ab, %</b>	<b>Содержание анортита An, %</b>	<b>Номер плагиоклаза</b>	<b>Группа</b>
Альбит $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	90–100	0–10	0–10	Кислые плагиоклазы
Олигоклаз	70–90	10–30	10–30	
Андезин	50–70	30–50	30–50	Средние плагиоклазы
Лабрадор	30–50	50–70	50–70	Основные плагиоклазы
Битовнит	10–30	70–90	70–90	
Анортит $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	0–10	90–100	90–100	

Наиболее часто замещают друг друга натрий и калий, кальций и магний, двухвалентное железо и марганец. Это можно объяснить взаимозаменяемостью в кристаллической решетке элементов, близких по своему химизму.

Помимо совершенного изоморфизма встречается ограниченный (несовершенный) изоморфизм. Он характерен для полевошпатовых минералов и вызван значительной разницей в величинах ионных радиусов калия К и натрия Na, приведенных здесь в нанометрах (нм) – радиус иона  $K^+ = 0,133$ , радиус иона  $Na^+ = 0,098$ .

Твердые растворы соединений с этими ионами, образовавшиеся при высокой температуре, при постепенном понижении ее распадаются с образованием так называемых пертитов (закономерных сростаний продуктов распада твердых растворов).

В ряду твердых изоморфных растворов физические свойства изменяются непрерывно в зависимости от концентрации каждого компонента. Это дает возможность подбирать и кристаллизовать материал с преимуществом каждого из исходных компонентов, создавая вещества с заданными свойствами.

Способность изоморфных веществ к взаимному нарастанию кристаллов успешно используется в технике выращивания кристаллов.

## ПОЛИМОРФИЗМ

Полиморфизм (от греч. «πολυ» – «много» и «μορφη» – «форма», многообразный) открыт Э. Митчерлихом в том же 1819 году, что и изоморфизм.

Если *изоморфизм* – это свойство минералов образовывать одинаковые формы кристаллов при различном химическом составе, то *полиморфизм*, наоборот, есть свойство минералов образовывать различные формы кристаллов (две или несколько модификаций) при изменении термодинамических условий, чаще всего температуры, при одинаковом химическом составе, но с различными физико-химическими свойствами и с различной кристаллической структурой.

Вначале приведем характерные формы кристаллов, выросших при различных природных условиях (кварца и барита), а затем рассмотрим характеристику некоторых полиморфных модификаций.

Такие формы называют модификациями и обозначают  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т.д. Такое обозначение модификаций разделяется не всеми исследователями, но другого пока нет.

Полиморфизм в последнее время представляют с точки зрения кристаллохимии на атомном или ионном уровне, при этом базой его считают межатомные



или ионные расстояния, а не атомные или ионные размеры их сфер. От деформированности характера окружающей среды изменяются промежутки между атомами, формы кристаллов видоизменяются. Изменение внешних условий и вызывает полиморфное превращение (Поваренных, Оноприенко, 1985).

Полиморфизм широко распространен в природе. Для примера рассмотрим ряд полиморфных модификаций. Из них – алмаз и графит, кальцит и арагонит, кварц и барит.

1. Полиморфный переход графит  $\leftrightarrow$  алмаз сопровождается изменением типа связи: в алмазе связи чисто ковалентные, в слоистой структуре графита связи между слоями Ван-дер-Ваальсовы, а внутри слоев – ковалентные с некоторой долей металличности.

Алмаз обладает кубической сингонией, алмазным блеском, обычно бесцветный, прозрачный, с низкой электропроводностью, предельно высокой твердостью (10) из всех природных кристаллов, диэлектрик или полупроводник.

Графит – гексагональный, черного цвета, с полуметаллическим блеском, непрозрачный, один из самых мягких минералов (твердость 1), хороший проводник электричества.

Алмаз гораздо плотнее, чем графит: когда алмаз превращается в графит, физические свойства графита изменяются и объем материала увеличивается на 36%. Скорость превращения алмаза в графит чрезвычайно мала, и поэтому алмаз существует при обычных условиях в виде вполне устойчивой модификации.

Многочисленные попытки синтеза кристаллов алмаза долго были безуспешными, и только в последние годы, когда научились создавать высокие давления и температуры, стали выращивать их в большом количестве.

При температуре выше 1000 °С алмаз легко и быстро переходит в графит. В противоположность этому превратить графит в алмаз удастся лишь при температурах более 3000 °С и давлениях до  $1 \cdot 10^8$  Па, т.е. при условиях термодинамической устойчивости алмаза. Поэтому при условиях термодинамической устойчивости (высокой температуре и давлении) алмаз образуется из графита и существует без изменений.

2. Карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$  в природе встречается довольно часто в виде двух минеральных форм – тригонального кальцита и ромбического арагонита, благодаря явлению полиморфизма, они различаются по форме кристаллов и физическим свойствам.

3. Кремнезем  $\text{SiO}_2$  встречается в виде 8 модификаций, каждая из которых может существовать при определенных физико-химических условиях (температуры или давления), составе среды.

Минералы группы кварца являются типичными полиморфными модификациями кремнезема. Вначале было выделено шесть основных модификаций кремнезема, а позже И. Костов (1971) добавляет к ним еще два – коэсит и стишовит:

- |                     |                        |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------------|
| 1) $\alpha$ -кварц; | 3) $\alpha$ -тридимит; | 5) $\alpha$ -кристобалит; |
| 2) $\beta$ -кварц;  | 4) $\beta$ -тридимит;  | 6) $\beta$ -кристобалит.  |

Из них самой распространенной и наиболее устойчивой модификацией является  $\alpha$ -кварц, или просто кварц.

В обычных условиях существует  $\alpha$ -кварц тригональной сингонии, а в интервале температур 870–573 °С существует другая модификация –  $\beta$ -кварц гексагональной сингонии.

Температура 573 °С – температурная граница существования этих двух модификаций кварца  $\text{SiO}_2$ . Границу перехода двух веществ стали называть *геологическим термометром*.

Помимо этих, известны другие модификации  $\text{SiO}_2$ :  $\beta$ -тридимит гексагональной сингонии образуется при температуре 870 °С и существует до 1470 °С; а при температуре 1470 °С  $\beta$ -тридимит переходит в  $\beta$ -кристобалит кубической сингонии, он устойчив в интервале температур 1470–1713 °С. При температуре 1713 °С возникает расплав.

Из всех вышеперечисленных заслуживает внимания полиморфная модификация кремнезема стишовит  $\text{SiO}_3$  – тетрагональная модификация, плотность 4,35 г/см<sup>3</sup>, тогда как плотность кварца составляет 2,65 г/см<sup>3</sup>. Плотность изменилась за счет изменения координационного числа, которое определяется шестерной координацией. Стишовит вначале был получен в лаборатории при температуре 1200–1400 °С и давлении порядка 1,6–10<sup>8</sup> Па (10<sup>5</sup> Па приблизительно равны 1 атмосфере), а позже обнаружен в природных условиях в метеоритном кратере, где он образовался в результате громадного давления и резкого повышения температуры в момент падения метеорита.

## ТЕМАТИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО КРИСТАЛЛОГРАФИИ

### *Первое занятие по кристаллографии (2 часа).*

1. Закон постоянства двугранных углов в кристаллах.
2. Особенности кристаллического вещества.
3. Элементы пространственной решетки.
4. Как определить кристаллографию как науку?
5. Перечень сингоний.

### *Второе занятие по кристаллографии (2 часа).*

1. Симметрия, ее определение, основные элементы (центр симметрии, оси симметрии, плоскости симметрии).
2. Категории симметрии.
3. Что такое простая форма и комбинация простых форм?
4. Изоморфизм.
5. Простые формы кубической сингонии.

### *Третье занятие по кристаллографии (2 часа).*

1. Важнейшие типы пространственных решеток Е.С. Федорова.
2. Чем отличаются краевые дислокации от винтовых?
3. Полиморфизм.
4. Простые формы средних сингоний.
5. Закон целых чисел, или закон рациональных отношений параметров.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как растут кристаллы?
2. Какие фигуры называются равными и симметричными? Примеры.
3. Симметрия и элементы симметрии (перечислить) в кристаллографии.
4. Какие оси симметрии могут быть на кристаллах? Как обозначается порядок оси? Перечислите плоскости симметрии на кристаллах. Каких плоскостей нет совсем?
5. Дайте определение центру симметрии. В каких фигурах нет центра симметрии? Какое существует правило определения наличия центра симметрии у кристаллов?
6. Вид симметрии. Сколько видов (классов) симметрии существует в царстве кристаллов?
7. Чем отличаются друг от друга кристаллы низшей, средней и высшей категорий?
8. Сингония и по какому принципу виды симметрии объединяются в сингонии, сколько их и как называются?
9. Охарактеризуйте кратко каждую сингонию.
10. Чем обусловлена геометрически правильная форма? Пространственная решетка и из каких элементов она состоит? Отличие ее от пространственной кристаллической решеток.
11. Перечислите три основных свойства кристаллов. Дайте характеристику однородности кристаллов. Требования к однородности кристалла.
12. Что такое анизотропность кристаллов? Примеры.
13. Расскажите о способности кристаллов самоограняться.
14. Какие вопросы рассматривает геометрическая кристаллография?
15. Какие условия необходимы для равномерного роста кристалла во все стороны? Какие явления сопровождают кристаллизацию?
16. В чем сущность закона постоянства углов на кристаллах?
17. В чем состоит гониометрическое измерение углов между кристаллами с помощью прикладного гониометра и двукружного отражательного гониометра?
18. Что называется простой формой и комбинацией простых форм? Сколько простых форм известно на кристаллах? Перечислите простые формы на кристаллах низшей категории.
19. Чем отличается ромбическая призма от ромбической пирамиды и как

- отличить пирамиды от дипирамид? Назовите отличие призм на кристаллах средней категории от ромбической призмы.
20. Чем отличаются пирамиды от дипирамид на кристаллах низшей и средней категорий?
  21. Как расположены грани призм в средних сингониях относительно главных осей симметрии – тройной, четвертной и шестерной?
  22. Чем отличается ромбоэдр от куба (гексаэдра) и тригональной дипирамиды, ромбическая пирамида от тетрагональной дипирамиды и октаэдра?
  23. Как называются простые формы в кристаллах средней сингонии, грани которых расположены параллельно главной оси симметрии, пересекают главную ось с одной стороны и с двух сторон?
  24. Существуют ли в чистом виде (без других простых форм) призмы и пирамиды в кристаллах низших и средних сингоний?
  25. Почему все простые формы кубической сингонии образуют замкнутые многогранники?
  26. Какие виды усложнений наблюдаются на поверхности реальных кристаллов? В каких случаях образуются скелетные формы реальных кристаллов? Что такое дендриты? Вицинали?
  27. Как могут срастаться кристаллы? Классификация кристаллических срастаний.
  28. Дайте определение двойника. Чем отличаются параллельные срастания от двойниковых? Что называется двойниковой плоскостью, двойниковой осью и двойниковым швом?
  29. Приведите примеры различных типов двойниковых срастаний и прорастаний.
  30. Что такое полисинтетические двойники? Для каких минералов они характерны? Охарактеризуйте двойниковые срастания: «ласточкин хвост», коленчатый двойник.
  31. Закон Гаюи, дайте его формулировку. Почему отношение параметров двух граней равно целым, простым и сравнительно малым числам?
  32. Что называется символом грани? Почему символы граней являются обязательной характеристикой кристаллов и почему при определении их берут обратные отношения параметров?
  33. Как выбираются координатные кристаллические оси в кристаллах кубической, тетрагональной и ромбической сингоний?
  34. Что называется единичной гранью? Какую грань принимают за единичную в кубической, тетрагональной и ромбической сингониях?

35. Что называют геометрическими константами кристалла? Какой индекс в символе получают грани, параллельные одной или одновременно двум координатным осям?
36. Каким простым формам соответствуют символы (111), (100) и (110) в кубической, тетрагональной и ромбической сингониях?
37. Как по виду символа грани можно узнать, что кристалл принадлежит гексагональной, тетрагональной и ромбической сингонии (рис. 34–36)?
38. Сущность опыта Лауэ. Какие выводы были сделаны на основании опыта Лауэ?
39. Что изучает кристаллохимия?
40. Назовите основные типы пространственных решеток Е.С. Федорова. Сущность закона кристаллографических пределов Е.С. Федорова.
41. Чем отличается винтовая дислокация от краевых? Их практическое значение.
42. Чем отличается кубическая плотнейшая упаковка от гексагональной? Их значение.
43. Координационные числа и их практическое применение.
44. Основные типы связей между частицами в кристаллических структурах. В чем принципиальное различие между ними?
45. Охарактеризуйте кристаллическую структуру самородной меди и каменной соли.
46. Каковы основные типы кристаллических структур? Основное различие между ними.
47. Изоморфизм, его сущность. Совершенный изоморфизм, понятие о смешанных кристаллах. Как пишутся изоморфные смеси?
48. В чем сущность полиморфизма? Как современная кристаллохимия объясняет существование полиморфных модификаций одних и тех же химических веществ?

**ЧАСТЬ II**

**ОСНОВЫ  
МИНЕРАЛОГИИ**





## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

**Минералогия** – это наука о минералах, их происхождении, классификации, химическом составе, физических свойствах, способах определения и применения. Это одна из древнейших наук геологического цикла.

Минерал (от позднелатинского «*minera*») – руда или полезное ископаемое. В современный период, обобщив все главнейшие существенные признаки минералов, А.С. Поваренных и др. (1985) так их определяют: **минералы** – природные, твердые, кристаллические составные части горных пород, руд и других агрегатов неорганического мира, представляющие собой химические соединения или простые элементы, образующиеся в результате физико-химических процессов в земной коре и в прилегающих к ней оболочках (атмосфере и гидросфере).

Определение увязывает генетическую связь минералов с горными породами и рудами.

В соответствии с этим определением условие твердости исключает из числа минералов жидкости и газы. А вместе с этим некоторые минералоги исключают все кристаллы органического генезиса и искусственные кристаллы как не относящиеся к минералам.

С начала 80-х годов XX в. в Чехословакии ученые вывели воду из числа минералов и подобно нефти включили ее в состав горных пород. Кроме того, жидкости и газы – это не минералы, а среды. Из жидкостей в числе минералов оставлена лишь ртуть Hg.

Прошел большой период времени с тех пор, когда была начата расшифровка внутреннего строения всех минералов. Оказалось, что среди них аморфные минералы единичны (опал, магнезит и некоторые глинистые минералы), остальные – кристаллические или скрытокристаллические (для глаза).

Критерием кристаллического состояния является закономерное, упорядоченное расположение атомов в решетке минерала. Такое состояние способствует существованию его в качестве **индивида** и **минерального вида**. Обособленное выделение минерала, обладающего единой кристаллической структурой и естественной внешней формой, называется **индивидом**. В этом смысле совершенный кристалл и зерно горной породы – индивиды, вполне равноправные. Только во втором случае тенденция к кристаллическому самоограничению не реализована из-за стесненных условий образования. В природе все минералы

существуют в виде кристаллических индивидов, но большей частью не поодиночке, а в минеральных агрегатах (Кантор, 1986).

Принимая во внимание химические и структурные границы минерального вида и учитывая зависимость их от внешних условий, Поваренных (1985) дает такое определение этого понятия: *к одному минеральному виду относятся все минеральные индивиды одинаковой структурной группы, химического состава, лежащего в пределах ряда непрерывного изменения и равновесного существования в определенных термодинамических условиях земной коры.* Эти термины – минеральный вид и индивид – появились в связи с открытием явления изоморфизма и полиморфизма Митчерлихом в 1819 году.

В природе известно более трех тысяч различных минералов. Но только около 50 из них образуют горные породы, активно используемые в строительном деле, и называются *породообразующими*.

Для определения их существует большое количество методов, которые требуют специальных знаний, приборов и лабораторий:

- кристаллографический;
- рентгеноструктурный;
- химический;
- оптический и т.д.

Но известен и простой «макроскопический» метод определения минералов путем наблюдения легко различимых (внешних) признаков: цвета, блеска, твердости и т.д. Определение минерала будет более точным, если было выявлено наибольшее число его внешних признаков. При этом необходимо помнить, что каждому минералу отвечает определенный комплекс внешних признаков (по Н.А. Смольянинову, 1951), ныне называемых *физическими свойствами*.

## **ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ**

В современный период большинство отечественных и зарубежных минералогов считают, что минералы образуются в результате сложных термодинамических условий и физико-химических процессов в земной коре и на ее поверхности. Они генетически тесно связаны с горными породами.

Учеными была разработана схема процессов образования минералов, основанием для нее послужили изучение огромного количества минеральных видов, условия их нахождения в земной коре, экспериментальные данные

физики и химии, геологические и геохимические представления о термодинамических условиях различных оболочек Земли.

В результате в крупном плане были выделены следующие процессы минералообразования:

1. Интрузивные (глубинные) – связанные с магмой.
2. Эффузивные (поверхностные) – связанные с лавой.
3. Экзогенные (поверхностные).
4. Метаморфические (преобразующие).

Каждый из этих процессов подразделяется на более мелкие типы. Например, к эндогенным (глубинными) процессам, протекающим в недрах Земли, обычно относятся магматический, пегматитовый, пневматолитовый, гидротермальный и метаморфический процессы минералообразования.

Каждый минерал может образовываться и существовать только в условиях *определенной концентрации минерального вещества, температуры и давления*. При изменении этих условий минералы разрушаются или переходят в другие вторичные образования, или даже испаряются.

Термодинамическую характеристику вышеуказанных процессов и количество образующихся минералов в них приводит И.А. Карлович (2004) по данным Б. Кантора (табл. 6).

Таблица 6

**Процессы минералообразования**

<i>Тип процесса</i>	<i>Давление, <math>n \cdot 10^5 \text{ Па}</math></i>	<i>Температура, °С</i>	<i>Число, образующихся минералов</i>
Интрузивный	6000–10000	600–900 (до 1200)	12
Эффузивный	1–800	до 1500	10
Пегматитовый	4500–5500	400–700	22
Гидротермальный	2400–3500	50–40	43
Гипергенный*	около 1	до 50–60	49
Метаморфический	2200–17000	450–950	12

\* При уплотнении и окаменении осадка температура может повышаться до 90–100 °С и давление до  $800 \cdot 100^5 \text{ Па}$ .

В результате протекания в природе двух процессов – изоморфизма и полиморфизма – образуется большое количество порообразующих минералов.

## ЭНДОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Эти процессы многочисленны, но для описания взяты наиболее значимые, которые связаны с магмой или лавой.

Магматический процесс происходит в глубинах земной коры и называется **интрузивным**. Он связан с понижением температуры и остыванием, дифференциацией и кристаллизацией минералов из расплавленной магмы и ее производных (горячих водных растворов и газов) или аналогичных магме растворов расплавленного вещества, называемого **лавой** – эффузивный процесс при ее излиянии из вулканов на поверхность Земли.

**Магма** – это огненно-жидкий силикатный расплав, сложного химического состава, обогащенный газами (F, Cl, H, CO<sub>2</sub>), летучими компонентами (S, P, B) и парами воды. Для магматических условий кристаллизации (табл. 6) характерны температуры до умеренных, широкие интервалы изменений давления при несколько ограниченных интервалах изменения химического состава. Заметим, что чем больше давление, тем меньше температура, и наоборот (табл. 6).

Последовательность кристаллизации минералов из магмы при ее охлаждении зависит от исходного состава и условий кристаллизации.

Общая схема процесса кристаллизации отражается реакционным рядом Боуэна (рис. 60).

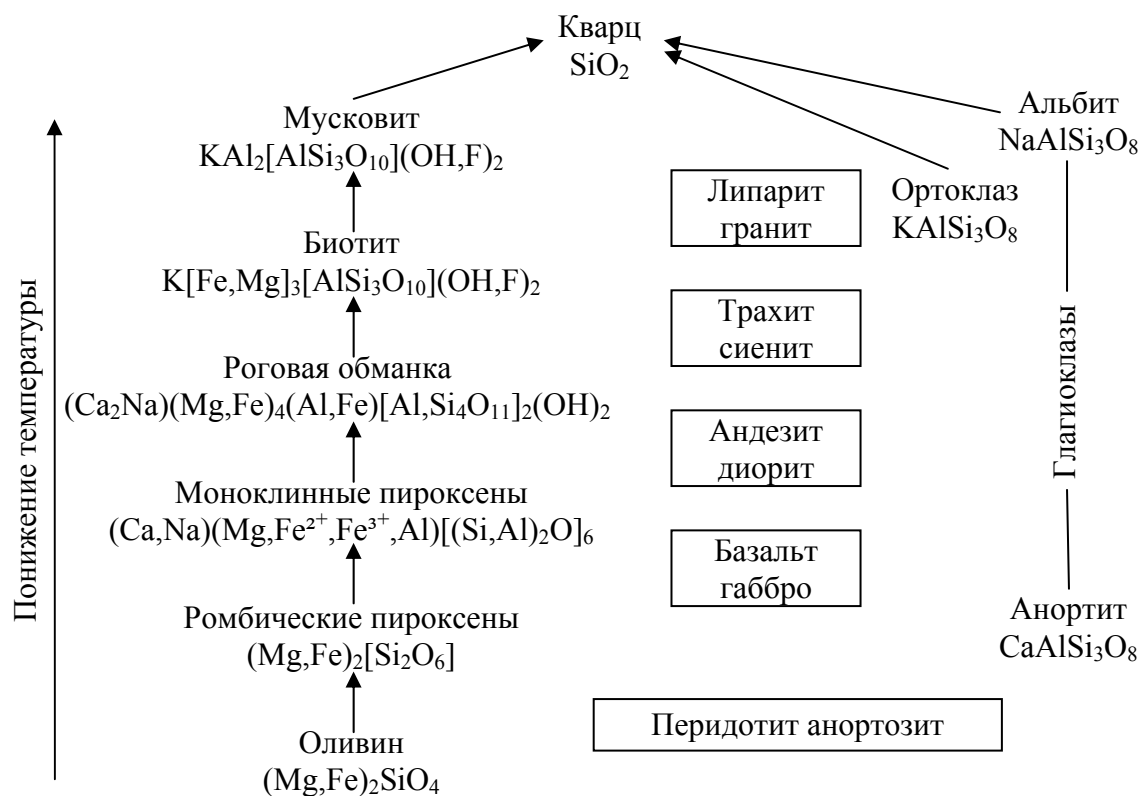


Рис. 60. Реакционный ряд Боуэна

В левой части схемы представлена последовательность кристаллизации минералов, обогащенных Mg и Fe (мафические или темноцветные составляющие пород). С правой стороны показана последовательность кристаллизации минералов, богатых Si и Al (салические – светлые минералы).

В средней части отражена последовательность образования горных пород из выкристаллизуемых минералов. Из приведенной схемы следует, что из темноцветных минералов первым образуется оливин, по мере роста кристаллы его опускаются вглубь. За оливином выпадают ромбические и моноклинные пироксены, далее – роговые обманки и т.д.

Первыми из полевошпатового ряда выделяются основные плагиоклазы (например, анортит), за ними средние, а после них щелочные и кислые (альбит).

При понижении температуры магмы оливин, например, реагирует с расплавом и переходит в пироксен. Кварц выпадает последним. На порядок кристаллизации большое влияние оказывают летучие компоненты.

В процессе кристаллизации магмы увеличивается ее кислотность и возрастает роль воды, что способствует на поздних стадиях образованию все более кислых пород.

Ряд темноцветных минералов начинается с кристаллизации оливина, его кремнекислородных тетраэдров  $[\text{SiO}_4]$ . При снижении температуры кремнекислородные тетраэдры объединяются в бесконечные одинарные цепочки  $[\text{Si}_2\text{O}_6]_n$ , участвующие при образовании пироксенов сдвоенные цепочки  $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]$ , составные части амфиболов или слои  $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]_n$  в составе слюд (мусковита, биотита). Они связываются с возрастающими по размерам катионами:  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ . Второй, салический ряд (светлоокрашенных минералов) начинается кристаллизацией анортита  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  и заканчивается его натровым аналогом альбитом  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ . В этом ряду тенденция к образованию все более кислых (т.е. обогащающихся кремнеземом) членов (Костов, 1971). Последним кристаллизуется кварц и различные химические элементы. Таким образом, при магматическом процессе образуются силикаты и кварц (рис. 60).

Большинство магматических минералов являются порообразующими минералами. Они отличаются высокими прочностными характеристиками, высокой плотностью и твердостью, не растворяются водой, инертны к кислотам и щелочам.

## ПЕГМАТИТОВЫЙ ПРОЦЕСС МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Ученые при исследованиях этого процесса пришли к выводу, что к концу главного магматического процесса кристаллизации и образования соответствующих минералов типов пород обычно возникает остаточный раствор, обогащенный щелочами и легколетучими компонентами F, Cl, B, дающий начало другим типам минералов и пород.

Остаточный расплав из-за наличия легколетучих компонентов обладает высокой текучестью, проникает в трещины и полости вмещающих пород. Такие образования называются пегматитовыми, или пегматитовыми жилами. Они возникают в интервале температур примерно 700–400 °С (Костов, 1971). Пегматиты обладают крупнозернистой структурой, отдельные минералы могут достигать гигантских размеров. Кристаллы кварца, например, достигают иногда 5,5 м в длину и 2,5 м в диаметре, встречаются кристаллы берилла длиной 6 м и весом до 200 т, кристаллы ортоклаза размером 10х10 м и весом до 100 т, призматические кристаллы турмалина длиной 3 м, кристаллы слюды с площадью поверхности 7 м<sup>2</sup> и т.д. Характерную особенность многих пегматитов представляют графические сростания кварца и ортоклаза, известные как «письменные граниты», напоминающие восточные письма. Температура образования по Кантору 400–700 °С, давление 4500–5500 Па.

## ПНЕВМАТОЛИТОВОЕ И ГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ

*Пневматолитовое* минералообразование происходит только при кристаллизации расплава, насыщенного летучими компонентами (B, P, S) и парами воды. Пары воды и газы отделяются от магматического очага и при своем движении в условиях низких температур и пониженного давления кристаллизуются в трещинах и на стенках жерлов вулканов, переходя из газообразного состояния в твердое: самородная сера, флюорит, минералы бора, рудные минералы (молибденит MoS<sub>2</sub>) и многие другие.

Минералы этого генезиса могут быть составными частями руд и магматических горных пород, при разрушении выветриванием некоторые из них переходят в осадочные горные породы.

*Гидротермальное* минералообразование идет при остывании горячего водного раствора – гидротерм, носит название гидротермального. Эти горячие

водные растворы восходят из магматических очагов при кристаллизации магмы и циркулируют в трещинах земной коры, образуя гидротермальные жилы, содержащие большое количество минералов (например, кварц, флюорит и ценные руды). Из них извлекают олово, свинец, медь и многое другое.

## ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

*Экзогенные процессы* широко развиты на поверхности земной коры, и они очень разнообразны. Этому способствуют солнечная энергия, наличие кислорода и углекислоты в воздухе, колебания температур, атмосферные осадки и поверхностные водные растворы различного состава, разрушение горных пород и минералов и образование новых – осадочных. К этому же процессу относится образование химических минералов.

Под влиянием указанных выше факторов магматические минералы – силикаты – претерпевают физико-химические изменения: распадаются на составные части, а затем образуются новые, более устойчивые минералы, приспособленные к новым термодинамическим условиям. Все это связано с процессами выветривания (физического, химического и органического). В результате процессов химического выветривания (растворения, окисления и восстановления, гидратации и многих других) широко образуются глинистые минералы (гидрослюда, каолинит, монтмориллонит и др.), а также разнообразные соединения пирита, сульфатов, окислов, карбонатов.

Многие экзогенные минералы на поверхности земли образуются за счет жизнедеятельности животных и растительных организмов (биогенные или органогенные минералы). Некоторые исследователи не считают их минералами.

В настоящее время обнаружено биогенное происхождение каолинита, опала (аморфного кремнезема)  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  и кальцита  $\text{CaCO}_3$ .

Железопоглощающие бактерии образуют бурые железняки  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

К экзогенным минералам относятся и те, которые образуются в результате выпадения из вод океанов, морей, озер, мелководных лагун и т.д.

Выпадение минеральных солей в них происходит в периоды интенсивного испарения воды или изменения ее температуры, когда вода становится пересыщенной по отношению к солям; таким путем образуются гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , галит  $\text{NaCl}$  и др.

В результате при экзогенном генезисе минералы образуются физическим, химическим или биохимическим путем, условия их образования характеризуются

умеренным интервалом изменения температуры (обычно между 0 и 40 °С), более или менее постоянным давлением (близким к атмосферному) и большим разнообразием. При этом исходным материалом служат существующие ранее горные породы или продукты их выветривания. Эти минералы имеют разнообразные свойства, не отличаются высокими качествами, у них низкая прочность и твердость, особенно у глинистых минералов, они практически нерастворимы; соли, наоборот, легко растворяются в воде.

Многие минералы экзогенного происхождения являются составными частями разнообразных осадочных горных пород.

## МЕТАМОРФИЗМ

Метаморфические процессы активно, без переплавления преобразуют минералы и горные породы в результате изменения физико-химических условий, существующих в литосфере, когда они попадают ниже зоны выветривания и седиментации. Такие преобразования приводят к новым минералам в силикатных горных породах, изменению их структуры и текстуры. Нижний предел температуры образования метаморфических минералов и горных пород равен 300–400 °С и до 1000 °С. При температуре равной 1200 °С и более, лучше идет переплавление пород, чем метаморфическое изменение.

В соответствии с природой факторов, обуславливающих метаморфизм, различают следующие виды метаморфических процессов:

а) **динамометаморфизм** с преобладающим действием направленного давления или стресса;

б) **термический, или контактовый, метаморфизм**, вызываемый прогревом близлежащего магматического источника – поднятием снизу расплавленных масс магмы или связанных с ней растворов. Это считают основной причиной образования контактового метаморфизма;

в) **метасоматический метаморфизм**, связанный с привнесением или выносом вещества под действием газов (пневматолитовый метаморфизм), растворов (гидротермальный метаморфизм) или силикатных расплавов (инъекционный метаморфизм);

г) **региональный метаморфизм** происходит в результате погружения пород на значительную глубину под действием геологических процессов обширной территории, температуры и гидростатического давления. Считается, что это



главная причина образования регионального метаморфизма, без непосредственной связи с контактами тех или иных интрузий. В горных породах происходит перегруппировка компонентов с образованием новых минералов. А сами породы превращаются в сланцы и гнейсы. В глубинных зонах литосферы он переходит в плутонический, или ультраметаморфизм, при котором явления инъекции, плавления и переплавления пород играют важную роль;

д) **ударным, или импульсным, метаморфизмом** называют эффект, вызываемый падением метеорита на земную поверхность. Образуются уплотненные модификации кремнезема – коэсит и стишовит.

**Метаморфогенные минералы** образуются в результате изменившихся внешних условий (например, при погружении поверхностных участков земной коры, внедрений в осадочные и другие породы магматических масс и т.д.). Эндогенные и экзогенные минералы претерпевают существенные изменения, переходя в новых условиях в новые устойчивые соединения или минералы, которые приобретают высокую плотность, твердость и, естественно, прочность.

Характерными метаморфическими минералами будут кварц, микроклин, ортоклаз (в виде порфиробласта), хлорит, актинолит и др.

## ВАЖНЕЙШИЕ СТРУКТУРЫ МИНЕРАЛОВ

Почти все природные минералы (за немногим исключением – аморфные) являются кристаллическими.

В кристаллических минералах структура (внутреннее строение) отличается строго определенным пространственным расположением составляющих их частиц – атомов, ионов и молекул. Для каждого минерала они имеют определенное упорядоченное расположение в виде пространственной кристаллической решетки.

В зависимости от того, что находится в узлах пространственной решетки минерала – атомы, ионы или молекулы, различают соответственно атомные (графит, алмаз), ионные (галит) или молекулярные структуры, содержащие воду. Структуры у минералов могут быть простыми или очень сложными, например у силикатов.

Рентгеноструктурный анализ помог расшифровать структуры кристаллических решеток силикатов, и была создана общая теория их строения, а позже и структуры всех остальных классов. Основным структурным элементом является

кремнекислородный тетраэдр с длиной ребра около  $2,5 \text{ \AA}$ , в вершинах которого находятся атомы кислорода, а в центре – атом кремния. Такие атомы по своему строению подобны анионам серной, фосфорной и других типичных кислот, но их особенностью является склонность к образованию более сложных анионов путем соединения двух или более тетраэдров через общий атом кислорода. В простейшем случае группа состоит из двух тетраэдров, при дальнейшем усложнении получаются кольца из 3, 4, 6 тетраэдров, могут быть бесконечные постройки из тетраэдров, соединенных в цепочки, ленты (из шестерных колец), слои. В предельном случае, когда каждый кислородный атом одновременно принадлежит двум соседним тетраэдрам, получается бесконечный, в трех измерениях каркас (рис. 61).

В результате расшифровки кристаллических решеток у минералов выделены следующие типы структур (мотивов – по А.С. Поваренных, 1984): координационная (галит, золото, медь, алмаз и др.); островная (сульфаты, карбонаты, фосфаты, некоторые силикаты – рис. 61, а, б); в том числе островная по кольцевому типу (берилл, турмалин и др. – рис. 61, в, г); цепочечная (пироксены – рис. 61, д); ленточная (амфиболы и др. – рис. 61, е); листовая (графит, каолинит, тальк, слюды и др. – рис. 61, ж); каркасная (алюмосиликаты, полевые шпаты и др. – рис. 61, з).

Все эти типы структур минералов нашли отражение в кристаллохимической классификации в качестве подклассов (с. 112, табл. 9).

В силу беспорядочного, незакономерного расположения составляющих частиц аморфные минералы подобных структур не имеют и в природе неустойчивы, могут переходить в кристаллическое состояние.

Какими структурами обладают минералы изучаемой коллекции, благодаря которым выделены подклассы, можно посмотреть в кристаллохимической классификации.

## **ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФОРМУЛЫ МИНЕРАЛОВ**

Всего в мире насчитывается 3000 природных минеральных видов, обладающих химическим составом. Искусственных минералов гораздо больше, но некоторые минералогии исключают их из числа минералов, так как они не имеют связи с земной корой, часто они представляют собой не минералы, а смеси и не могут образовывать индивиды, составляющие основу понятия минерал.

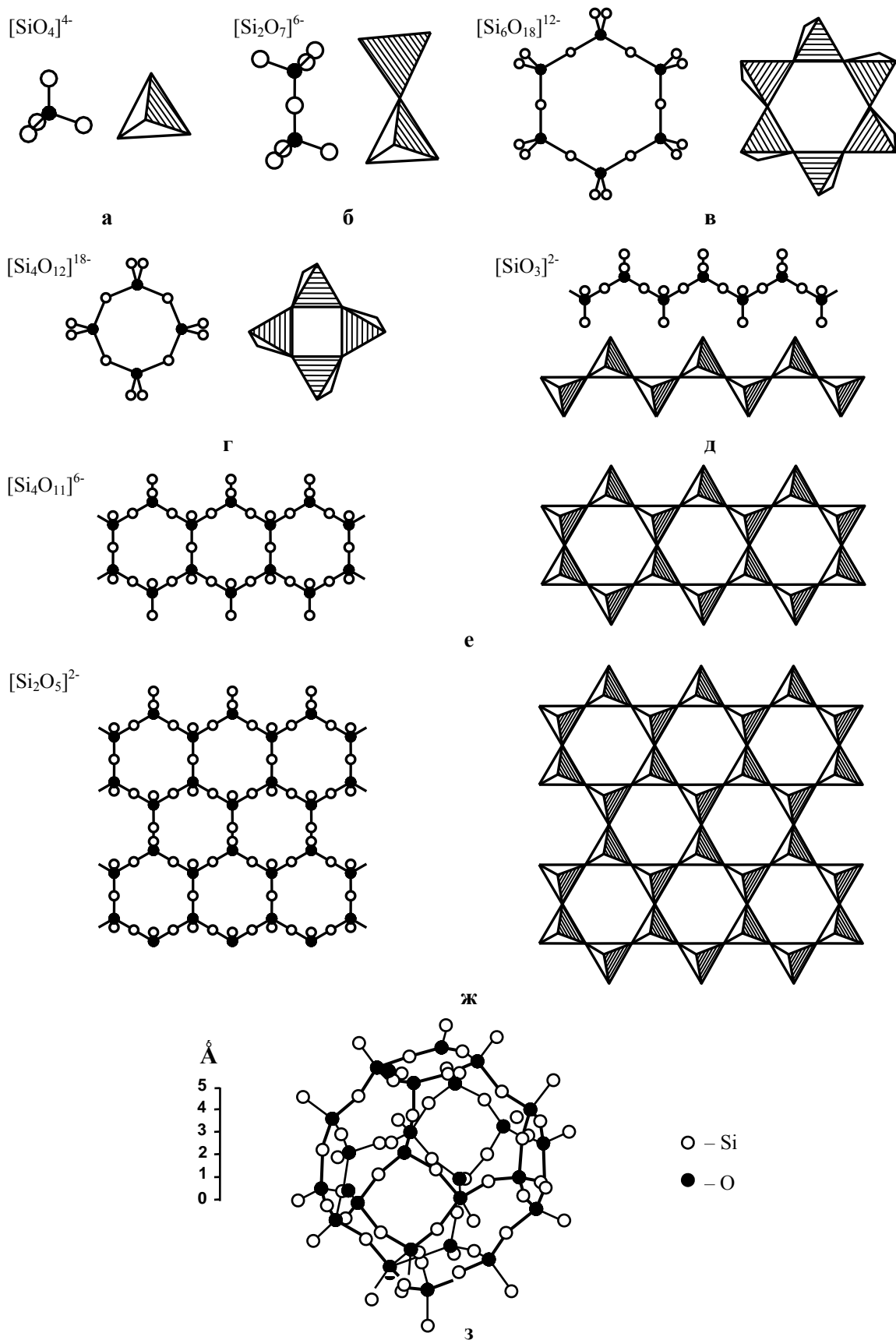


Рис. 61. Типы соединения кремнекислородных тетраэдров: а – изолированный тетраэдр; б – группа из двух тетраэдров (сдвоенных); в–з – группы соединенных тетраэдров, образующие: в, г – кольца, д – цепочку, е – ленту, ж – слой (лист), з – каркас

Каждый минерал состоит из главных химических элементов, определяющих его сущность и самостоятельность или входящих в его состав в качестве примесей (при составлении формул они не учитываются). Химический состав минералов не остается постоянным, а может изменяться в различных пределах (например, изоморфное замещение элементов и др.). Но, несмотря на это, у большинства минералов химический состав остается постоянным. Это позволяет отличать их друг от друга, выражать его в формулах и, используя единство и взаимосвязь химического состава с их внутренним строением, производить кристаллохимическую классификацию минералов. В единстве химического состава и структуры минералов ведущим признаком является химический состав, а структура подчинена ему (Поваренных, Оноприенко, 1985), но роль ее огромна. Благодаря структуре расшифрованы все типы кристаллических решеток минералов, сначала класса «Силикаты», а затем и всех остальных классов.

Химический состав минералов выражается в виде отдельных химических элементов или их соединений, как продуктов химических реакций, протекающих в земной коре. Минералы могут существовать при определенных физико-химических условиях, определенной температуре, давлении и концентрации химических веществ. При изменении условий изменяется и минерал или переходит в другое состояние, более устойчивое в новой обстановке.

При знакомстве закономерен вопрос: как составляются их формулы? Приводим два простых примера. Для этого нужна таблица химических элементов Д.И. Менделеева и данные химического анализа минерала.

Химический состав минералов выражается двояко:

1. Цифрами валового химического анализа в весовых процентах (определяются в химических лабораториях).
2. В виде химических формул, которые составляются и сопровождают описание каждого минерала (см. «Основы минералогии»).

Предположим, при химическом анализе у одного минерала в химико-аналитической лаборатории выявлено содержание химических элементов в весовых процентах:

- |               |             |              |
|---------------|-------------|--------------|
| 1. Na – 39,4% | атомный вес | Na – 22,991* |
| 2. Cl – 60,6% | атомный вес | Cl – 35,457  |

Для получения формулы минерала надо указанные цифры весовых процентов минерала поделить на соответствующие атомные веса и определить атомные количества. Числа пропорциональные и по возможности упрощенные служат коэффициентами в химической формуле минерала.

---

\* Здесь и далее данные приведены из таблицы химических элементов Д.И. Менделеева

**Пример расчета формулы этого минерала**

<b>№ n/n</b>	<b>Весовые проценты, %</b>	<b>Атомные количества</b>	<b>Отношения между атомными количествами</b>	<b>Формула минерала</b>
1	Na – 39,4	$\frac{39,4}{22,991} = 1,07$	1	NaCl – галит
2	Cl – 60,6	$\frac{60,6}{35,457} = 1,07$	1	

А у другого минерала при химическом анализе определено содержание окислов в весовых процентах:

- |    |  |             |            |          |
|----|--|-------------|------------|----------|
| 1. | K <sub>2</sub> O – 16,9%               | атомный вес | K = 39,0   | O = 16,0 |
| 2. | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 18,4% | атомный вес | Al = 26,97 | O = 16,0 |
| 3. | SiO <sub>2</sub> – 64,7%               | атомный вес | Si = 64,7  | O = 16,0 |

Для получения формулы второго минерала надо указанные цифры весовых процентов окислов поделить на соответствующие молекулярные количества. Но в начале определяют молекулярные количества, определить которые для каждого окисла нетрудно, если известны атомные веса элементов, которые надо умножить на их количество и затем сложить:

- $K_2O = 39,0 \cdot 2 + 16,0 = 94$
- $Al_2O_3 = 26,97 \cdot 2 + (16,0 \cdot 3) = 101,94$
- $SiO_2 = 28,09 + (16,0 \cdot 2) = 60,09$

**Пример расчета формулы минерала**

<b>№ n/n</b>	<b>Весовые проценты окислов, %</b>	<b>Молекулярные количества</b>	<b>Отношения между молеку- лярными количествами</b>	<b>Формула минерала</b>
1	K <sub>2</sub> O – 16,9	$\frac{16,9}{94} = 0,179 = 0,18$	1	Формула минерала в виде окислов: K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> или в виде отдельных элементов: K <sub>2</sub> ·Al <sub>2</sub> ·Si <sub>6</sub> O <sub>16</sub> или в виде струк- турной формулы: K·[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ] – ортоклаз
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 18,4	$\frac{18,4}{101,94} = 0,180 = 0,18$	1	
3	SiO <sub>2</sub> – 64,7	$\frac{64,7}{60,09} = 1,076 = 1,08$	6	

Химические формулы минерала отображают состав химически индивидуальных веществ посредством химических знаков и формул.

Формула называется эмпирической, если она дает представление только о химическом составе минерала. Формулы, которые, кроме того, позволяют судить о типе химического соединения, о взаимных связях между его отдельными элементами, называются структурными или кристаллическими.

Например, формула малахита:

1. Эмпирическая –  $\text{H}_2\text{Cu}_2\text{CO}_5$ .

2. Структурная –  $\text{O} = \text{C} \begin{cases} \text{O} - \text{Cu} - \text{OH} \\ \text{O} - \text{Cu} - \text{OH} \end{cases}$

$(\text{CuOH})_2[\text{CO}_3]$  – основная медная соль угольной кислоты или  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2[\text{CO}_3]$ .

В настоящее время в области изучения структур огромное значение приобрел рентгеноструктурный анализ, позволивший экспериментальным путем устанавливать реальные структуры минералов. Причем применяется много способов написания химических формул.

Круглые, квадратные, фигурные и другие виды скобок отражают структурные группировки элементов: комплексные ионы, сочетания в виде цепочек, лент, листов и каркасов.

## КЛАССИФИКАЦИЯ МИНЕРАЛОВ

К настоящему времени на всем протяжении развития науки минералогии было составлено исследователями большое количество различных классификаций минералов. Они обновлялись всякий раз или составлялись заново, как только выявлялись в минералах новые свойства.

В самом начале первого периода развития минералогии и на всем его протяжении, охватившем несколько десятков веков, в основу классификации включались только физические свойства минералов.

В середине XIX века появилась **химическая классификация**, основой которой послужили накопленные данные по химическому составу минералов. Он лучше отражал природу минералов и был одним из существенных их признаков. С тех пор и до 30-х годов XX века химическая классификация оставалась господствующей.

В этот период были попытки разработать новую кристаллохимическую классификацию П. Гротом и Е.С. Федоровым, но она не была закончена.

С 30-х годов XX века произошел в минералогии революционный переход на новую, существенно кристаллохимическую основу познания внутреннего строения минералов, на новое атомное (конструкционное) их строение.

Развитие этой классификации продолжалось до 50-х годов двадцатого столетия. В классификацию стали включаться химический состав и строение, единство которых отражает коренную сущность минерала и определяет все его свойства.

К этому периоду подробно, на уже новом уровне были изучены только силикаты. Остальные классы систематизировались пока только по одному химическому составу. Позже, в 70-х годах двадцатого столетия, естественную классификацию минералов составил А.С. Поваренных. По характеру химического соединения весь минеральный мир он подразделил на четыре типа соединений:

- гомоатомные;
- сульфидные;
- кислородные;
- галогенидные.

Последовательность типов в классификации он расставил в зависимости от изменения характера химической связи от ковалентно-химической (простые вещества и сульфиды), через промежуточную ионно-ковалентную (оксиды) к существованию ионной (галоиды). Абсолютное большинство минералов входит в тип кислородных соединений: окислы, гидроокислы, силикаты, фосфаты, карбонаты, сульфаты и др. В полной классификации их 14 классов. Классы разделяются на подклассы по структурному признаку (мотиву). Были выделены вначале структурные мотивы для класса силикатов, а позже и другие классы подразделены по этому признаку на подклассы, в которых были выделены группы по химическому составу.

Ниже приводится сокращенный вариант кристаллохимической классификации минералов (табл. 9). В ней выделены подразделения, преимущественно составленные из порообразующих минералов.

Для примера разновидности по особенностям внешних признаков минерала (различная окраска), приведены вне классификации.

**Кристаллохимическая классификация минеральных видов  
по А.С. Поваренных (1985)**

<b>ТИПЫ И КЛАССЫ</b>	
<b>ПОДКЛАСС, ГРУППА</b>	<b>ГЛАВНЕЙШИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВИДЫ И ИХ ФОРМУЛЫ</b>
<i>I</i>	<i>2</i>
<b>I. ПРОСТЫЕ ВЕЩЕСТВА (гомоатомные)</b>	
<i>КЛАСС САМОРОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.</i> <i>Класс насчитывает около 50 минералов, составляет 0,1% объема земной коры</i>	
<i>Листовой, гр. графита</i>	Графит С      Алмаз С
<i>Кольцевой, гр. серы</i>	Сера S
<b>II. СЕРНИСТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ИХ АНАЛОГИ (сульфидные)</b>	
<i>КЛАСС СУЛЬФИДЫ – соединения металлов с серой.</i> <i>Класс насчитывает около 200 минералов, составляет 0,25% объема земной коры</i>	
<i>Островной, гр. пирита</i>	Пирит FeS <sub>2</sub>
<i>Координационный, гр. галенита</i>	Галенит PbS
<i>То же, гр. халькопирита</i>	Халькопирит CuFeS <sub>2</sub>
<i>Цепочечный, гр. киновари</i>	Киноварь HgS
<b>III. КИСЛОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ</b>	
<i>КЛАСС ОКИСЛЫ (оксиды).</i> <i>Класс насчитывает более 300 природных минералов, а вместе с гидроокислами составляет 17% объема земной коры</i>	
<i>Каркасный, гр. кварца</i>	Кварц (молочно-белого цвета) SiO <sub>2</sub> Халцедон SiO <sub>2</sub>
<i>Листовой, гр. корунда</i>	Корунд (и его драгоценные разновидности: рубин, сапфир) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<i>То же, гр. гематита</i>	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Магнетит Fe·Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
<i>КЛАСС ГИДРООКИСЛЫ (гидроксиды) – соединение элементов с гидроксидом</i>	
<i>Каркасный, гр. кварца</i>	Опал SiO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O
<i>То же, гр. гематита</i>	Лимонит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O
<i>КЛАСС СИЛИКАТЫ – соли кремниевых и алюмокремниевых кислот, главный элемент в составе – Si.</i> <i>Класс насчитывает не менее 800 природных минералов, составляет 90% объема земной коры</i>	
<i>Каркасный, гр. ортоклаза (полевые шпаты)</i>	Ортоклаз K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> или K[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]
<i>То же, гр. микроклина (полевые шпаты)</i>	Микроклин K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> или K[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]
<i>То же, гр. плагиоклазы (натровые полевые шпаты)</i>	Плагиоклазы: а) кислые б) средние в) основные
<i>То же, гр. фельдшпатидов</i>	Нефелин NaAl[SiO <sub>4</sub> ]
<i>Цепочечный, гр. пироксена-авгита</i>	Авгит (Ca,Na)(Mg,Fe <sup>2+</sup> ,Fe <sup>3+</sup> ,Al)[(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]
<i>То же, гр. энстатита</i>	Энстатит Mg <sub>2</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]



1	2
<i>Ленточный, гр. актинолита</i>	Актинолит $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$
<i>То же, гр. роговой обманки</i>	Роговая обманка $(\text{Ca,Na})_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg,Al,Mn,Ti})_3 \cdot [\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_2]_2 \cdot \text{Fe}[\text{OH,F}]_2$
<i>Листовой, гр. серпентина</i>	Серпентин $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
<i>То же, гр. мусковита</i>	Мусковит $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ или $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
<i>То же, гр. биотита</i>	Биотит $\text{K}_2\text{O} \cdot 6(\text{Mg,Fe})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или $\text{K}[\text{Fe,Mg}]_3[\text{Al,Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
<i>То же, гр. талька</i>	Тальк $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
<i>То же, гр. гидрослюд</i>	Иллит $(\text{K,H}_2\text{O})\text{Al}_2[(\text{Al,Si})\text{Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
<i>То же, гр. каолинита</i>	Каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
<i>То же, гр. монтмориллонита</i>	Монтмориллонит $(\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 (\text{Al,Fe})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O}))$
<i>То же, гр. вермикулита</i>	Вермикулит $(\text{Mg,Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3[(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]4\text{H}_2\text{O}$
<i>Островной, гр. оливина</i>	Оливин $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$
<i>То же, гр. топаза</i>	Топаз $\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{F,OH})_2$
<i>Островной, по кольцевому типу*, гр. берилла</i>	Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_{18}]$
<i>То же, гр. турмалина</i>	Турмалин $\text{Na}(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Fe})_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}][\text{B}_3\text{O}_3]_8(\text{OH,F})_4$
<i>КЛАСС ФОСФАТЫ – соли фосфорных кислот. В классе 350 природных минералов, составляют 0,70% объема земной коры</i>	
<i>Островной, гр. апатита</i>	Апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F,Cl,OH})_2$
<i>КЛАСС СУЛЬФАТЫ соли серной кислоты. Класс насчитывает 260 природных минералов, составляет 0,1% объема земной коры</i>	
<i>Листовой, гр. гипса (водные сульфаты)</i>	Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
<i>Островной, гр. ангидрита (безводные сульфаты)</i>	Ангидрит $\text{CaSO}_4$
<i>То же, гр. барита (безводные сульфаты)</i>	Барит $\text{BaSO}_4$
<i>КЛАСС КАРБОНАТЫ – соли угольной кислоты. Класс насчитывает 80 природных минералов, составляет 2% объема земной коры</i>	
<i>Островной, гр. кальцита</i>	Кальцит $\text{CaCO}_3$ , кристаллическая разновидность кальцита: исландский шпат
<i>То же, гр. магнезита</i>	Магнезит (кристаллический и аморфный) $\text{MgCO}_3$
<i>То же, гр. доломита</i>	Доломит $(\text{Ca,Mg})[\text{CO}_3]_2$
<i>То же, гр. малахита</i>	Малахит $\text{Cu}_2[\text{CO}_3] \cdot (\text{OH})_2$
<b>IV. ГАЛОГЕНИДЫ</b>	
<i>КЛАСС ГАЛОИДЫ – соли хлористо- и фтористоводородных кислот. Класс насчитывает около 120 природных минералов</i>	
<i>Координационный, гр. галита</i>	Галит $\text{NaCl}$
<i>То же, гр. флюорита</i>	Флюорит $\text{CaF}_2$

В классификации у некоторых минералов есть разновидности, выделяемые

или только по цвету (у кварца) или по скрытокристаллической структуре и цвету минерала (у халцедона). Для примера – у кварца имеются разновидности, отличающиеся только по цвету:

- горный хрусталь – бесцветный;
- аметист – фиолетовый;
- дымчатый кварц – цвет вызван радиоактивным излучением;
- желтый кварц (цитрин) – это аметист, подвергшийся тепловой обработке;
- розовый кварц – встречается редко.

У халцедона разновидности обладают скрытокристаллической структурой и цветом:

- агат – полосчатая разновидность халцедона, обусловленная прерывистым ростом;
- карнеол – красный халцедон;
- сард – красновато-коричневый халцедон;
- гелиотроп – зеленый халцедон;
- моховой агат – белый или кремовый халцедон;
- яшма (непрозрачный халцедон) – красного, желтого или коричневого цветов (из-за примесей коллоидных частиц окислов железа);
- кремнь – массивный непрозрачный халцедон, обычно белый, бледно-желтый, коричневый, черный (в виде конкреций);
- окремнелая древесина – остатки древесины, у которых органическое вещество замещено минеральным, чаще всего халцедоном;
- тигровый глаз – псевдоморфоза халцедона по асбестовидному минералу и др.

## НАЗВАНИЕ МИНЕРАЛОВ

При открытии новых минералов каждый называет их без определенной системы и без каких-либо ограничений. Так считают многие исследователи.

Однако должны соблюдаться правила приоритета и единственное существует условие – чтобы название минерала оканчивалось на *-ит*. Окончательно название минерала утверждается Международной минералогической ассоциацией по новым минералам, действующей с 1958 г. и по настоящее время.

Названия минералам даются в соответствии с формой, химическим составом или их физическими свойствами, а также по названию места находки, в

честь знаменитых людей и в связи с полетом человека в космос – в честь космонавтов.

В 90-х годах XX века на реке Чара в Восточной Сибири был открыт новый минерал – чаро**ит** и позже утвержден Международной минералогической ассоциацией. В связи с полетом первого человека в космос был назван новый минерал в честь Ю.А. Гагарина – гагарин**итом**. В честь известного геолога В.А. Обручева новый минерал получил название обручев**ит** и мн. др.

Многие ранние названия минералов произошли от греческих или латинских слов, которые дают определенную информацию о минерале, например о его цвете: альбит – от латинского «albus», т.е. «белый». Некоторые названия несут информацию о кристаллической форме, габитусе или плотности: барит – от греч. «βαρος», т.е. «тяжелый»; дистен – от греч. «δι» – «два» и «στενος» – «прочность», двоякотвердый, имеет резкое различие твердости в перпендикулярных направлениях. Другие связаны с химическим составом минералов, например кальцит. Используются в названиях также информативные суффиксы, например –**клаз** (от греч. «κλασις» – «ломание»): орто**клаз** – по наличию двух направлений спайности под прямым углом. Следует подчеркнуть, что названия, данные в ранний период развития минералогии без принятого окончания –**ит**, являются исключением: кварц, полевой шпат и др.

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Физические свойства минералов, в условиях когда минералогия – непрофилирующий предмет и имеет место дефицит времени, лучше изучать, как показывает многолетний опыт, в такой последовательности:

1. Прочитать «Внешние диагностические признаки главнейших породообразующих минералов» (только теоретическую часть). Для примера взять на лекцию несколько породообразующих и рудных минералов, направляя их по рядам по ходу подачи лекционного материала.
2. Изучить все практические способы макроскопического определения внешних признаков (физических свойств) на образцах минералов учебной коллекции под руководством преподавателя.
3. Провести занятия по самостоятельному определению и описанию конкретных образцов минералов (в краткой табличной форме). В помощь студенту выдаются методические указания или учебное пособие для лабораторных работ.
4. Выдать домашнее задание для описания минимума минералов (по вариантам) и форму описания, приготовленные заблаговременно кафедрой.
5. Вне сетки часов расписания провести коллоквиум по минералам учебной коллекции и проверить выполнение домашнего задания.

### ВНЕШНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ГЛАВНЕЙШИХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

*(теоретическая часть)*

#### МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. ВНЕШНЯЯ ФОРМА МИНЕРАЛОВ

Минералы, обладающие характерным обликом кристаллов, разделяются на три группы в изометрии (трехмерном пространстве):

1. **Изометрические формы**, одинаково развитые по всем трем направлениям (ширине, толщине и высоте-длине), типичными примерами служат пирит, магнетит, гранат и мн. др.).

2. **Вытянутые в двух направлениях формы**, при сохранении *третьего коротким* (здесь можно сделать измерение длины и ширины, а толщина сильно уступает этим двум измерениям): пластинчатые, таблитчатые, листовые и чешуйчатые кристаллы – гипс, барит и биотит (рис. 63).
3. **Вытянутые** (удлиненные) **в одном направлении формы** – призматические, столбчатые, игольчатые и лучистые – горный хрусталь, актинолит и др.

В природе кристаллические минералы в виде геометрически правильных одиночных кристаллов встречаются исключительно редко. В частности, это широко распространенные зернистые агрегаты, обладающие различными размерами зерен и кристаллическим строением, но при своем росте из-за стесненных условий утративших правильную геометрическую форму. Кроме зернистых агрегатов, встречаются землистые образования, напоминающие рыхлую почву. Волокнистые агрегаты образуют асбест с шелковым блеском, лучистые агрегаты из зеленых лучиков образуют актинолит. В природе встречаются еще и другие формы минералов, приведенные в кристаллографии (I часть пособия).

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Основными оптическими свойствами минералов, определяемыми макроскопически (невооруженным глазом), являются цвет (окраска), цвет черты, прозрачность и блеск.

### ЦВЕТ

Цвет (окраска) минерала является важным диагностическим признаком, если он характеризуется постоянным химическим составом и, соответственно, обладает постоянным цветом. Такой цвет называется *собственным*, или *идиохроматическим*. Он никогда не изменяется. Собственной окраской обладают малахит и хлорит – минералы ярко-зеленого цвета, пирит – латунно-желтого, азурит – синего, золото – золотисто-желтого, киноварь – красного и т.д. Эти минералы легко определяются по их характерной окраске.

Собственную окраску имеют и темноокрашенные минералы, но их немного. В состав минералов входят разнообразные химические элементы или химические соединения, придавая им определенную характерную окраску.

Возникшая окраска от ничтожно малого количества примесей в составе минерала называется *примесной*, или *аллохроматической*. Классическим примером минерала с примесной окраской является корунд  $Al_2O_3$ , обычно бесцветный, но иногда встречается в виде красного рубина (VIII\*, рис. 3) или розового, желтого, зеленого, а также синего сапфира (VIII, рис. 1, 2).

За счет примесей бесцветный кварц может быть черным (морион), дымчатым (раухтопаз), золотистым (цитрин), зеленым (празем), фиолетовым (аметист) и др. (V, VI). Дымчатый кварц появляется из-за замещения кремния алюминием. Примесная окраска непостоянна – в различных образцах одного и того же минерала может либо наблюдаться, либо нет. Фиолетовую окраску аметиста иногда связывают с нарушениями (дефектами) в кристаллической решетке. Изменение окраски в связи с нарушениями в кристаллической решетке вызвано у аметиста внедрением в нее лишнего электрона («чужого»). Поэтому примесная окраска при определении минералов может привести к ошибке.

Некоторые минералы обладают кажущимся цветом, не являющимся для них истинным, – такой цвет называется *псевдохроматическим*, или *ложной окраской*. Она связана не с цветом самого минерала, а с наличием мелких включений, граней или системы трещин, свет от них отражается, что воспринимается глазом как игра цветов – иризация, ярко выраженная у лабрадора и опала. На минералах могут возникать радужные пленки, называемые побежалостью (халькопирит – III, рис. 4). Окраска у минералов может выцветать на солнечном свете.

При определении цвета минералов надо, чтобы они были чистыми или имели свежий излом. По цвету минералы можно разделить на шесть групп:

1. Белый, сероватый или минерал бесцветный.
2. Желтый, бурый, коричневый, розовый, красный.
3. Зеленый.
4. Голубой, синий, фиолетовый.
5. Темно-серый, черный.
6. Окраска пестрая, многоцветная, зональная.

Помимо основного цвета необходимо научиться определять видимые оттенки (например, темно-серый, светло-зеленый и т.д.).

По одному только цвету определять минералы не следует, так как для большинства минералов он непостоянен. Например, полевые шпаты бывают белого, желтого, зеленого, красного, темно-серого цвета; кальцит – белый,

---

\* Здесь и далее указана нумерация цветных вкладок

желтый, зеленый, голубой, фиолетовый, бурый, черный. Поэтому цвет надо рассматривать в совокупности с другими свойствами.

Яркая окраска минералов позволяет применять их в качестве прочного долговечного декоративного материала. По окраске иногда судят об условиях образования минералов (например, темно-зеленые, почти черные авгит, роговая обманка – глубинные магматические).

Природную окраску человек научился изменять. Цвета некоторых минералов могут изменяться под влиянием нагревания или атомной бомбардировки (например, рентгена или гамма-лучей, или нейтронного пучка). Например, при нагревании желтоватый топаз превращается в розовый. С помощью гамма-облучения можно вернуть его первоначальный желтый цвет, который он изменил на розовый в результате нагревания. Атомная бомбардировка бесцветного алмаза придает ему светло-зеленый или голубоватый цвет, причем изменение окраски ограничивается лишь поверхностной зоной, толщиной в несколько десятков микрон. Нагревание иногда дает обратный результат по сравнению с атомной бомбардировкой. Например, дымчатый кварц можно обесцветить нагреванием, а вернуть прежнюю окраску можно атомной бомбардировкой. Аметист возникает из бесцветного кварца, благодаря не только нарушениям кристаллической решетки, но и при воздействии радиоактивного излучения. Аметист от этого изменяет цвет до зеленого и продается в качестве празема. Флюорит от радиоактивного воздействия принимает фиолетовую окраску. В месторождениях радиоактивных элементов он всегда имеет только фиолетовую окраску.

Итак, если цвет минералов обусловлен его собственным химическим составом, он всегда постоянный, собственный. Выделяют примесный (вызванный включениями других элементов в его состав), цвет от нарушений в кристаллической решетке, ложный цвет от отражения (иризации), а также изменение цвета от радиоактивного облучения или под влиянием нагревания.

## ЦВЕТ ЧЕРТЫ

*Цвет черты* в минералогии принято называть цветом тонкого порошка минерала, получаемого растиранием, чаще царапаньем его острым краем по фарфоровой неглазурованной поверхности пластинки (бисквита), или керамической плитки, или другим способом разрушения поверхности минерала. Цвет черты более постоянен, чем окраска в крупнозернистых образцах, и поэтому является ценной диагностической характеристикой.

Цвет черты наиболее важен при диагностике минералов с металлическим блеском. Например, гематит, лимонит и магнетит (красный, бурый и магнитный железняки) в образцах нередко имеют одинаковую черную окраску, но по цвету черты резко различаются.

Гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  обладает в порошке вишнево-красным цветом, лимонит  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \cdot \text{H}_2\text{O}$  – светло-желтым, а магнетит  $\text{Fe} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_4$  – черным. Если в магнетите присутствует примесь хлорита, то при получении черты наряду с черным цветом проявится и примесная окраска – зеленая, типичная для хлорита.

Пирит  $\text{FeS}_2$  имеет латунно-желтый цвет, а в порошке зеленовато-черный. Цвет черты особенно характерен для малопрозрачных и непрозрачных минералов.

Цветные или светлоокрашенные минералы дают, как правило, белую или светлоокрашенную черту. Цвет черты может совпадать с окраской минерала, а может и не совпадать.

Большинство твердых минералов (с тв.  $\text{H} > 6-7$ ) черты не дают, а царапают плитку. Очень твердые минералы (с тв.  $\text{H} = 8-10$ ), все без исключения, черты не дают, а царапают бисквит или керамическую плитку, создавая впечатление черты. Можно считать, что минерал дает черту, если она стирается пальцем. Поэтому следует помнить, что при определении цвета черты минералов на используемых поверхностях бисквита или керамической плитки твердость минералов не должна превышать твердости плитки ( $\text{H} = 6,5-7$ ).

## ПРОЗРАЧНОСТЬ

**Прозрачность (светопроницаемость)** – это способность минералов пропускать лучи света. Прозрачность целиком зависит от степени пропускания или отражения света минералом. У минералов, как правило, выделяют три степени прозрачности, в соответствии с которыми они подразделяются на три основные группы:

1. **Прозрачные** минералы, сквозь которые можно отчетливо рассматривать окружающие предметы как через абсолютно чистое оконное стекло (горный хрусталь, гипс пластинчатый – «марьино» стекло и др.).
2. **Полупрозрачные (просвечивающие)** минералы, пропускающие свет только в тонких сколах или пластинках толщиной 1 мм. Через такие пластины или сколы возможно различать только общие очертания предметов без деталей (гипс, киноварь, полевые шпаты, пироксены, амфиболы и мн. др.).



3. **Непрозрачные** минералы вообще не способны пропускать свет, от этого через них ничего не увидишь даже в тонких сколах (пирит и большая часть других сульфидов и самородных элементов).

Прозрачность характерна для минералов с неметаллическим блеском, а с металлическим блеском непрозрачны.

## БЛЕСК

Блеск минералов является одним из характерных физических свойств, зависящих в основном от показателя преломления, а также типа агрегатов. Его можно определять и как внешний вид минерала в отраженном свете. Если поверхность ровная, гладкая, то происходит отражение параллельных лучей, воспринимаемых глазом в виде блеска. В случае неровной поверхности световые лучи рассеиваются, выделяя при этом различные виды блеска (особенно жирный, восковой и матовый блеск). В случае гладкой поверхности блеск определяется интенсивностью поглощения и преломления света.

По характеру блеска минералы можно подразделить на две основные категории:

1. Минералы с **металлическим блеском** – это такие минералы, которые сильно поглощают видимый свет. Они тяжелые, непрозрачные или почти непрозрачные даже в очень тонких сколах и, как правило, имеют металлический блеск. Показатель преломления этих минералов 3 и более: самородные металлы, например золото и др., большая часть сульфидов (пирит), минералы железосодержащих окислов – магнетит и др. Сюда же относят минералы с полуметаллическим блеском (металловидным) – непрозрачные или почти непрозрачные минералы с показателями преломления от 2,6 до 3 – киноварь, гематит и графит. Блеск у графита подобен потускневшим поверхностям металлов. Минералы с полуметаллическим блеском в отдельную группу не выделяют.
2. Минералы с **нематаллическим блеском**:
  - стеклянный блеск характерен для минералов с показателем преломления от 1,3 до 1,9. В этот интервал попадает около 70% общего количества всех минералов, имеющих блеск – блеск поверхности стекла. Сюда относятся большинство карбонатов, сульфатов, фосфатов, галоидов, окислы, гидроокислы легких элементов (алюминия, магния);
  - перламутровый (пластинчатый гипс). Этот блеск возможен благодаря

- отражению света от внутренних плоскостей минерала. Поверхность минерала переливается, как перламутр, как внутренняя поверхность раковин;
- шелковистый (селенит – волокнистый гипс, хризотил – асбест и др.). Этот блеск обусловлен волокнистым строением минерала, его называют еще переливчатым – переливается, как шелк;
  - алмазный – сильный, яркий, сверкающий, искрящийся блеск (алмаз), характерен для минералов с показателями преломления от 1,9 до 2,6;
  - жирный (тальк, нефелин). Напоминает поверхность, как будто смазанную жиром;
  - матовый (каолинит, монтмориллонит и др.) – слабый, тусклый блеск, слабо отражает свет;
  - восковой блеск подобен жирному, но более слабый – халцедон.

Минералы с неметаллическим блеском чаще всего прозрачные или просвечивающие. Блеск вызывается количеством и характером света, отраженного поверхностями минералов. Он зависит от структуры этой поверхности и от силы отраженного света. Гладкая поверхность спайности будет отражать больше света, чем неровная поверхность излома, даже если эта поверхность одного и того же минерала. Важны малейшие изменения конфигурации поверхности. Различные кристаллические направления, особенно в анизотропных минералах будут различаться по количеству поглощенного света и, следовательно, в различной степени отражать падающие лучи. Поэтому даже различные поверхности одного и того же минерала могут иметь различный блеск.

Минерал с большим показателем преломления имеет более сильный блеск. Блеск не зависит от цвета драгоценных камней. Но от блеска зависит игра драгоценного камня: чем выше блеск (показатель преломления), тем сильнее игра и ощущение красоты драгоценного камня.

Блеск у порообразующих минералов тоже не зависит от их окраски, но зависит от гладкости, ровности и чистоты поверхности и показателя преломления и отражения. Чем больше отражается падающий свет от поверхности минерала, тем сильнее блеск.

Блеск, похожий на металлический, но более слабый, называется **полуметаллическим** (магнетит, графит).

Блеск, возникший при рассеивании света от неровной, шероховатой поверхности, называется **матовым** (каолинит, лимонит).

Таким образом, блеск – один из наиболее постоянных признаков большинства минералов, облегчающий их определение.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Отдельные физические свойства минералов изучает физическая кристаллография, остальные освещаются минералогией в связи с описанием минералов. Некоторые из них (такие, как твердость, спайность) описываются в обоих курсах.

Физические свойства минералов обусловлены:

- природой химических элементов, входящих в их состав;
- взаимным расположением химических элементов (структурной решетки);
- типом кристаллоструктурных связей, играющих часто большую роль.

Ниже дается описание следующих характерных физических свойств – твердости, спайности, хрупкости, изломов, ковкости, упругости, вязкости, плотности и др.

### ТВЕРДОСТЬ

**Твердость** – это свойство минералов оказывать в разной степени сопротивление разрушению в поверхностном слое при механическом воздействии на него царапаньем.

Определение твердости может производиться различными приборами и методами для различных областей народного хозяйства (с помощью давления, шлифования, сверления и др.), но в практике работы геологов и горняков обычно используется твердость царапанья. Это качественная оценка твердости.

Твердость – важное диагностическое свойство минералов. Условие твердости исключает из числа минералов жидкости и газы, являющиеся средой минералообразования.

Различают твердость:

1. **Абсолютную**, измеряемую прибором – склерометром (например, ПМТ-3 и др.) в процессе вдавливания алмазной четырехгранной пирамидки в испытываемую грань ( $\text{кг}\cdot\text{с}/\text{мм}^2$  или МПа). Таким прибором измеряют микротвердость у минералов, оценивая ее глубиной черты от алмазной точки или пирамидки при вдавливании. Определение абсолютной твердости в основном используется в промышленности, а в минералогии практически не применяется.
2. **Относительную** твердость определяют с помощью десяти минералов – эталонов шкалы Ф. Мооса, предложившего ее в 1824 г. Вот уже более двух веков ею пользуются во всем мире и маловероятно, чтобы она утра-

тила свое назначение в XXI веке. Шкалой Мооса полностью охватываются все десять степеней твердости у всех известных в мире минералов.

В шкале Мооса минералы-эталоны расположены в порядке увеличения твердости сверху вниз, и каждому из них условно присвоено определенное число, означающее его относительную твердость, совпадающее с местом, которое занимает минерал в шкале. Каждый последующий минерал в шкале царапает все предыдущие. Если у минералов твердости одинаковы, они царапают друг друга. Так, минерал тальк, обладающий самой низкой твердостью, наделен числом твердости, равной 1. С этого минерала начинается шкала Мооса и заканчивается алмазом, стоящим на десятом месте с относительной твердостью 10 и абсолютной твердостью, равной  $10060 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{мм}^2$ , или 1006 МПа. Выше числа твердости 10 и абсолютной твердости  $10060 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{мм}^2$  у минералов до сих пор не обнаружено, так же, как не обнаружены минералы с промежуточной твердостью между корундом и алмазом, интервал слишком велик.

В целом шкала Мооса представлена в табл. 10. Следует отметить, что алмаз обладает самой высокой твердостью, но из-за высокой хрупкости легко разрушается, достаточно только ударить по нему маленьким стальным молоточком, хотя чертит сталь.

Высокой твердостью обладают прозрачные минералы с высоким светопреломлением: топаз, берилл – твердость 8, корунд – 9, алмаз – 10, т.е. это группа минералов с неметаллическим блеском. Степень твердости у минералов зависит от энергетической связи между частицами (атомами, ионами): чем она сильнее, тем выше твердость, и наоборот.

Минералы в шкале Мооса и вне ее можно по относительной твердости делить на группы, выделяя:

- минералы низкой твердости –  $H = 1,2$  (тальк и гипс), это мягкие минералы – ноготь оставляет на них царапину;
- минералы средней твердости –  $H = 3-5$  (кальцит, флюорит, апатит), их царапает стекло, и апатит царапает стекло, т.к. твердости у них одинаковые;
- минералы твердые –  $H = 6-7$  (ортоклаз, кварц), царапают стекло;
- минералы очень твердые –  $H = 8-10$  (топаз, корунд, алмаз), оставляют царапину на стекле и горном хрустале. Топаз ( $H = 8$ ) царапает корунд и алмаз. Победит (сверхтвердая сталь) и алмаз царапают корунд. Алмаз можно царапнуть алмазом.

В природе преобладают минералы с твердостью от  $H = 2$  до  $H = 7$ , с более высокой относительной твердостью встречаются крайне редко.

Если нет шкалы Мооса, то можно использовать предметы-заменители Н.К. Разумовского (табл. 10) или другие предметы, твердость которых известна.

Как видно, в этой шкале твердость минералов условно обозначается целыми числами от 1 до 10. Поэтому следует помнить, что порядковый номер минерала шкалы Фридриха Мооса не означает истинную твердость и не показывает, во сколько раз один минерал тверже другого.

Например, твердость алмаза по шкале Ф. Мооса равна 10, кварца – 7, а талька – 1. Твердость кварца, определенная специальным прибором – склерометром, выше, чем талька в 3500 раз, а алмаз тверже кварца в 1150 раз. Несмотря на это, обе шкалы хорошо служат для быстрого определения у минерала его относительной твердости.

Таблица 10

**Шкала Ф. Мооса и Н. Разумовского**

<i>№ n/n</i>	<i>Минералы – эталон шкалы Мооса</i>	<i>Твердость по Моосу</i>	<i>Абсо- лютная твердость, кг/мм<sup>2</sup></i>	<i>Предметы – заменители проф. Н.К. Разумовского</i>	<i>Группы по твердости</i>
1	Тальк $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$	1	2,4	Графит мягкого карандаса	Минералы низкой твердости
2	Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2	36,0	Игла из мягкой алюми- ниевой проволоки	
3	Кальцит $CaCO_3$	3	109,0	Игла из медной проволоки (красной), медная монета	Минералы средней твердости
4	Флюорит $CaF_2$	4	189,0	Игла из железной проволоки или гвоздь	
5	Апатит $Ca_5(F,Cl,OH)(PO_4)_3$	5	536,0	Простое (оконное) стекло	
6	Ортоклаз $K[AlSi_3O_8]$	6	796,7	Перочинный нож из хорошей стали, швейная игла	Твердые минералы
7	Кварц $SiO_2$	7	1120,0	Напильник	
8	Топаз $Al_2[SiO_4](F,OH)_2$	8	1427,0	Нет заменителя	Очень твердые минералы
9	Корунд $Al_2O_3$	9	2060,0	Сверхтвердая сталь (победит)	
10	Алмаз C	10	10060,0	Нет заменителя	

## СПАЙНОСТЬ

**Спайность** – способность кристаллов и зерен минералов раскалываться или расщепляться по определенным направлениям с образованием ровных, гладких поверхностей.

Свойство спайности не зависит от внешней формы минерала, а зависит от строения кристаллической решетки. В пространственной решетке существуют плоские сетки, притяжение между которыми может быть наименьшим из-за большого межатомного расстояния между их атомами или ионами. Здесь они оказывают слабое сопротивление физическим воздействиям и дают при расколе ровные, гладкие поверхности.

По совершенству поверхности раскола, ее выдержанности выделяют пять степеней спайности:

- **весьма совершенная спайность** – характерна для слюд (биотита и мусковита). Их образцы можно без труда разделять на тонкие пластинки, но только вдоль этой спайности, в других направлениях (например, перпендикулярно спайности) это сделать невозможно, так как спайность у слюд проходит только в одном направлении. Спайность, подобная слюде, у других минералов тоже называется весьма совершенной;
- **совершенная спайность** – отличается тем, что при расколе минерала образуются так называемые мелкие выколки с ровными, гладкими поверхностями, форма которых аналогична форме минерала до раскола (исландский шпат, галит);
- **ясная спайность, или средняя**, – минералы раскалываются как по плоскостям спайности, так и по другим направлениям (ортоклаз). Спайность у него проявляется по двум направлениям под углом  $90^\circ$ ;
- **несовершенная спайность** – при расколе минерала на плоскостях обломков среди неровной поверхности выделяются небольшие площадки, ровные, гладкие (апатит);
- **весьма несовершенная** – спайности нет, минералы раскалываются по неопределенным направлениям (кварц, пирит), не образуя гладких поверхностей, или они выявляются с большим трудом.

Спайность всегда параллельна одной из реальных или возможных граней кристалла, имеющей, как правило, простые индексы.

**Положение** плоскостей спайности характеризуется названием соответствующей простой формы кристалла (например, октаэдрическая спайность) или индексами  $\{111\}$ . Возникшие от раскола поверхности спайности

всегда ровные, гладкие, блестящие. Этим поверхности спайности отличаются от других поверхностей (например, отдельностей), поэтому легко узнаются. Затем устанавливается ее качество (степень).

Спайность минералов иногда связывают с типами их связи, или структурами. Например, спайность минералов с металлической связью не бывает хорошей. В минералах с ковалентной связью спайность может быть, а может и не быть. Если присутствует, то направление спайности совпадает с плоскостями, характеризующимися наименьшей силой связи на единицу площади. Большая часть минералов с ионной связью имеет одно или несколько направлений совершенной спайности.

Для минералов из класса «Силикаты» характерны структурные особенности. Если в минерале тетраэдры изолированы или соединены в трехмерный каркас, то в них, как правило, спайность не проявляется.

Силикаты с группой тетраэдров обычно имеют одно направление ясной или неясной спайности, в силикатах с цепочечной или слоистой структурой спайность проходит между цепочками или слоями, никогда не пересекая их. Аморфные минералы лишены спайности.

Необходимо подчеркнуть, что спайность – важное свойство, с точки зрения механического использования минерала, нередко его применение в промышленности целиком определяется спайностью.

Способность мусковита раскалываться по спайности на очень тонкие слои в сочетании с диэлектрическими свойствами этого минерала позволяет использовать его в электротехнике как изолятор.

Смазывающие свойства графита и талька определяют их мягкость и ту легкость, с которой они раскалываются вдоль поверхности спайности. Карандаш пишет благодаря совершенной спайности графита и т.д.

## ОТДЕЛЬНОСТЬ

Отдельность – похожа на спайность, еще ее называют ложной спайностью. При отдельности раскалывание кристаллического минерала происходит, но только в отдельных, определенных участках, а не по определенным плоскостям, как в случае настоящей спайности, а именно это место ослаблено двойникованием, деформацией, а также из-за наличия в минерале ориентированных вростков или параллельных между собой пластинок, образованных в результате распада твердого раствора. Во всех этих случаях проявление отдельности способствует вторичному изменению минерала. Она может присутствовать или отсутствовать.

Образцы корунда обладают отдельностью, особенно характерны отдельности по плоскостям полисинтетического двойникования корунда, параллельного граням корунда, а также встречаются отдельности у пироксенов (авгита и др.).

## ПЛАСТИЧНОСТЬ

**Пластичность** – свойство твердых тел под действием внешних сил изменять, не разрушаясь, свою форму и размеры или сохранять остаточную деформацию после устранения действующих нагрузок.

Пластичность как поликристаллических веществ, так и монокристаллов связана с весьма сложными атомными и молекулярными коллективными группировками.

При высоких температурах и малых скоростях деформирования пластичность вызывается пластическим течением зерен и пластическим течением межзернового пространства, т.е. обоими процессами пластичности. При низких температурах и при динамической нагрузке на материал пластичность в основном обусловлена деформацией зерен.

Изучение пластичности твердых тел учитывается при разработке технологий многих производств, при расчетах отдельных деталей и сооружений в целом.

## ИЗЛОМ

**Излом** – вид различных форм поверхностей на обломках расколотого минерала, образованных не по спайности. Излом – это свойство, которое можно отнести к любому случаю раздробления образца минерала, не связанное с какими-либо кристаллографическими направлениями. В минералогии этот термин применяют только тогда, когда при раскалывании минерала образуются неровные поверхности. Излом характерен для минералов с несовершенной и весьма несовершенной спайностью или вовсе лишенных спайности. Минерал без спайности способен только дробиться и иметь неровный излом. По поверхностям раскола минералов судят о видах излома, которые нередко служат диагностическими признаками.

Излом, как и спайность, обусловлен особенностями строения минерала. Он обычно начинается возле трещины в образце и затем распространяется вдоль областей концентрации дислокаций, по ослабленным зонам или вдоль участков, обогащенных включениями. Такие поверхности раскола не отличаются прямолинейностью и, как правило, не параллельны, но зато отличаются некоторым разнообразием видов излома.



Излом характерен для минералов, у которых прочность (т.е. усилия связей и плотность распространения атомов) одинаковы или мало различаются в разных направлениях.

Выделяют следующие виды излома:

1. Ровный, гладкий излом – он образуется по весьма совершенной спайности и благодаря характеру поверхности относится только к ней.
2. Неровный излом – возникает у минералов без спайности.
3. Ступенчатый излом – образуется у минералов в связи с наличием у них совершенной и ясной спайности (полевые шпаты, кальцит), находящихся в двух перпендикулярных направлениях.
4. Раковистый излом – напоминает ребристую поверхность раковины (халцедон).
5. Занозистый излом – вид поверхности, характерной для минералов волокнистого строения (гипс – селенит, актинолит, роговая обманка).
6. Жирный – поверхность обломков, как бы смазанная жиром (оливин).
7. Матовый излом – характеризует потускневшую поверхность (каолинит).
8. Землистый излом – при надавливании образец рассыпается.
9. Крючковатый излом – характерен для самородных элементов (золото, медь, серебро), встречается редко и др.
10. Зернистый излом – типичен для минералов, находящихся в агрегатных скоплениях.

## ХРУПКОСТЬ

*Хрупкость* – это способность минерала при расколе молотком с шумом и большой скоростью разлетаться на мелкие куски или крошиться при проведении черты ножом или иглой, без заметной пластической деформации. Хрупкость, как и твердость, используется в качестве важного диагностического свойства.

Хрупкость зависит от многих факторов: структуры минерала, от примесей, вида напряженного состояния, скорости деформирования, температуры, формы образца и т.д. Эти факторы обуславливают потерю формы и сплошности исследуемых минералов.

Теория хрупкого разрушения минералов и других твердых тел свидетельствует, что раскалывание никогда не происходит одновременно по всей поверхности, а осуществляется путем «прорастания» (концентрации) трещин, возникающих в наиболее слабых, дефектных и перенапряженных местах.

Поэтому хрупкость устанавливают по появлению трещин при нагрузке прибора ПМТ-3. Первая же линия трещин от нагрузки характеризует число хрупкости. Большинство минералов хрупкие.

## КОВКОСТЬ

**Ковкость** – свойство, обратное хрупкости, и применимое только к минералам с металлической связью.

Ковкостью обладают только металлы, а не их соединения.

При ударах молотком такие минералы куются из кусков в тонкие пластинки, так как теряют только форму, а сплошность сохраняется (золото, самородная медь).

При царапанье ножом ковких минералов порошок не образуется, а на поверхности остается блестящий след.

## УПРУГОСТЬ

**Упругость** – свойство минералов сопротивляться изменению собственного объема и формы под воздействием механических напряжений, обусловленное возрастанием внутренней энергии. После прекращения действия сил, вызвавших упругие деформации, минералы восстанавливают свой объем и форму. Минералы, обладающие таким свойством, называются упругими, а деформация, исчезающая после снятия нагрузки, называется упругой деформацией. Упругой деформацией обладают такие минералы, как мусковит, биотит и другие слюды.

## ГИБКОСТЬ

**Гибкость** – способность минералов сгибаться под нагрузкой, но после снятия нагрузки не возвращаться в прежнее положение (например, тальк). Если возьмем тонкую пластинку талька, согнем ее под углом, затем снимем нагрузку, то убедимся, что это гибкий минерал, неупругий.

## ПЛОТНОСТЬ

Обычно по плотности, приблизительно, путем «взвешивания» на ладонях, минералы разделяют на:

- **легкие** (до 3 г/см<sup>3</sup>) – гипс, галит и кварц;
- **средние** (от 3 до 5 г/см<sup>3</sup>) – апатит, ортоклаз, слюда и др.;
- **тяжелые** (более 5 г/см<sup>3</sup>) – это, как правило, рудные минералы.

В абсолютных значениях плотность у минералов колеблется в широких пределах от 0,6 до 27 г/см<sup>3</sup> и определяется приборами в лабораториях.

## ОСОБЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Отдельные минералы обладают особыми, только им присущими свойствами, а именно:

- магнитностью (характерна для магнетита, определяется с помощью магнитной стрелки или магнитом);
- реакцией с 10% раствором HCl (свойственна кальциту, который «вскипает» – бурно выделяется CO<sub>2</sub> ( $\text{CaCO}_3 + \text{HCl} = \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), доломиту – только в порошке или в подогретой кислоте HCl);
- двойным лучепреломлением (исландский шпат, что связано с различными показателями преломления по разным направлениям, например текст будет двоиться, если рассматривать его через этот минерал);
- вкусовыми качествами (галит NaCl – соленый на вкус), минералы могут быть кислыми и горькими. Вкус дают легкорастворимые минералы;
- электризацией (самородная сера электризуется, если ее потереть шерстяной тряпочкой);
- выделение газообразных веществ в результате механических или температурных воздействий (запах чеснока издает минерал арсенопирит FeAsS, если его разбить молотком; сульфиды (пирит) при вскипании выделяют сероводород H<sub>2</sub>S; при горении самородной серы выделяется сернистый газ SO<sub>2</sub>, обладающий резким, неприятным запахом);
- растворимостью (обладает галит и еще небольшое количество минералов, остальные плохо растворяются или вообще нерастворимы);
- пьезоэлектрическими свойствами (горный хрусталь);
- люминесценцией (свечение улавливается специальным прибором (флюорит), это свойство используется в приборах ночного видения);
- электропроводностью (самородные минералы: медь, золото, железо, платина и серебро. Некоторые минералы из сульфидов и окислов – полупроводники, почти все остальные минералы непроводники. Такое разделение минералов производится по их электрическим свойствам. Проводники – минералы с металлической связью, а непроводники (изоляторы или диэлектрики) – минералы с ионной связью);
- радиоактивностью (характерна для минералов, содержащих радиоактивные элементы V, Th и другие, – уранит, торит и т.д.);
- плавлением (для одних минералов), тепловым расширением (для других).

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое минерал? Приведите примеры.
2. Как называются природные минералы в горных породах и рудах? Приведите примеры.
3. Формы минералов в изометрии (трехмерном пространстве)?
4. Какие бывают виды минеральных агрегатов?
5. Какие факторы влияют на окраску минералов?
6. Какую роль играет определение цвета черты при диагностике минералов?
7. Как оценивается у минералов прозрачность? Приведите примеры.
8. Назовите виды блеска у минералов.
9. Что такое твердость и как она определяется в минералогии?
10. Шкала Мооса. Сколько степеней относительной твердости можно определить у минералов с ее помощью?
11. Какие минералы вошли в шкалу Мооса?
12. Из каких предметов-заменителей состоит шкала проф. Разумовского?
13. Какой излом на минерале свидетельствует о наличии спайности?
14. Перечислите виды спайности.
15. Что такое излом и его виды?
16. Объясните, что такое хрупкость, ковкость, упругость и гибкость?
17. Как проверить магнитность у минералов?
18. Назовите у минералов другие особые свойства.

## СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНИХ ПРИЗНАКОВ НА ОБРАЗЦАХ МИНЕРАЛОВ

*(практическая часть)*

После того, как прочитана теоретическая часть о внешних диагностических признаках (физических свойствах) наиболее распространенных породообразующих минералов, необходимо практически ознакомить студентов со способами их определения на конкретных образцах. Для этого студентам группы выдается:

1. Специально подобранная учебная коллекция из породообразующих минералов, с включением в ее состав для сравнения нескольких рудных минералов и самородных элементов. Всего 42–45 небольших (называемых раздаточными) пронумерованных образцов в каждой коллекции, размещенных в 15 легких лотках (ящиках), разделенных внутри перегородками на соответствующее количество квадратов, размером 80x80 мм, имеющих точно такую же нумерацию. Здесь же положены предметы-заменители шкалы Мооса. Минералы разложены по классам и группам.
2. К каждой коллекции прикладывается картонная карточка с названиями минералов и их номерами, аналогичными номерам образцов и квадратов в ящике. Размер карточки в печатный лист А4.
3. Соляная кислота HCl 10%, в бутылочках объемом 10 мл с дозирующей пробкой.
4. Неглазурованная фарфоровая пластинка – «бисквит», или разрезанная на небольшие квадраты белая керамическая плитка, у которой используется обратная, шероховатая плоскость или узкие плоскости от самих разрезов.
5. Магнит, лучше подковообразный – он более сильный.
6. Лупы 4- и 10-кратного увеличения вместе или по отдельности.
7. Лист картона или ватмана размером 25x35 см каждому студенту для работы с образцами и предметами-заменителями, чтобы не портить поверхность столов; можно использовать легкие маленькие лотки или подносы.

### ***Порядок выполнения работы:***

1. Повторение студентами теоретической части о внешних диагностических признаках минералов по своим конспектам. Затем уточняется все, что было непонятно в теории по минералам.
2. На протяжении всего занятия определяются только внешние признаки на конкретных образцах, без подробных пока стандартных описаний, так как надо сначала познакомиться и научиться определять все диагностические свойства минералов.
3. Практическое определение внешних признаков проводится под руководством преподавателя, соблюдая предложенную им последовательность, подобно тому, как излагался материал по этой теме, добиваясь того, чтобы каждый студент узнал и усвоил все способы и приемы определения внешних признаков, с помощью которых мог определять минералы при их описании.

Выявления физических свойств (внешних признаков) минералов определяется в том же порядке, как был начитан материал, а именно, с их морфологии (внешней формы).

## **МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ**

Методически все минералы учебной коллекции (не более 40–45 небольших раздаточных образцов) по внешней форме надо разделить на две группы. В первую группу войдут только одиночные кристаллы минералов, а во вторую – различные минеральные агрегаты. Правильные формы минералов называются *габитусом*, их лучше отражают изготовленные формы (модели) кристаллов. Сначала работаем с одиночными кристаллами первой группы. В соответствии с развитием одиночных кристаллов минералов по трем взаимно перпендикулярным направлениям (в изометрии) разделите их на три вида форм:

1. ***Изометрические*** (одинаково развитые в трех направлениях). Сюда относятся все кристаллы кубической, октаэдрической и ромбододекаэдрической формы: пирит, магнетит, гранат и др. По карточке найдите их в первой группе, обратите внимание на их формы, сделайте в тетради зарисовку кубической и октаэдрической форм и подпишите названия минералов. Посмотрите их в цветном изображении (III, IX).

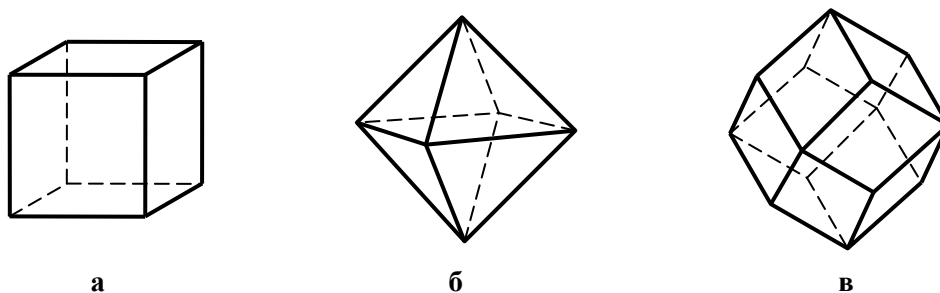


Рис. 62. Изометрические формы: а) пирит – кубический; б) магнетит – октаэдрический; в) гранат – ромбододекаэдрический

2. Вытянутые в двух направлениях (по длине и ширине) с укороченным третьим (по толщине) – *уплощенные*. Поэтому здесь характерны пластинчатые, листоватые, чешуйчатые формы минералов. Выделите из той же группы с помощью номеров на образцах и в карточке: гипс пластинчатый, барит, биотит. Замерив их, убедитесь, что они действительно лучше развиты в двух направлениях и плохо в третьем. Найдите эти минералы в цветном изображении (вкл. XIII).

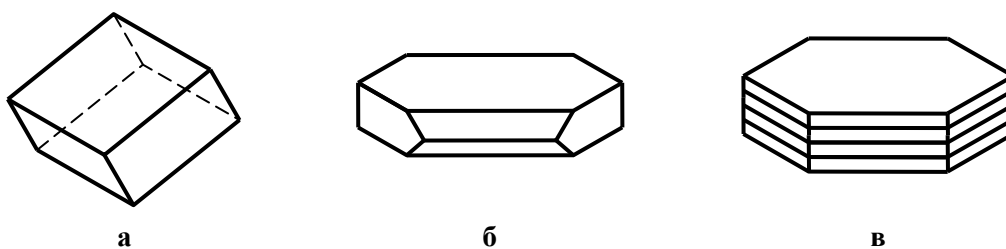


Рис. 63. Формы, вытянутые в двух направлениях, а третье короткое: а) гипс – пластинчатый; б) барит – таблитчатый; в) биотит – листоватый

3. Вытянутые в одном направлении, а два других развиты слабо – *удлиненные* формы. В первой группе выберите горный хрусталь, роговую обманку, актинолит лучистый и др.

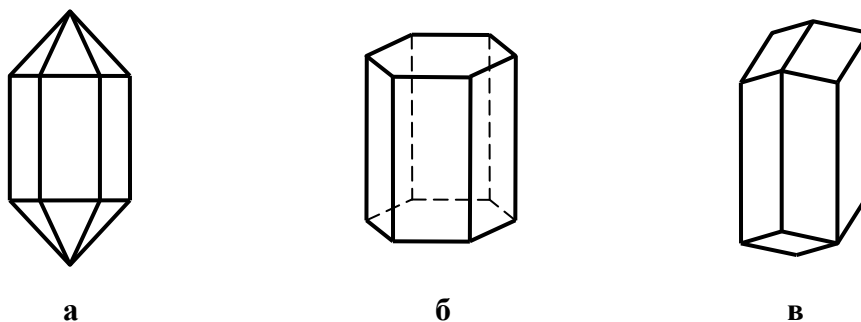


Рис. 64. Формы, вытянутые в одном направлении: а) кварц – призматический; б) роговая обманка – столбчатая; в) актинолит – лучистый

Таковы особенности роста форм кристаллов в изометрии, взятых в качестве представителей. Подобным образом выделяйте в изометрии и все другие одиночные кристаллы. Параллельно запоминайте минералы, образующие кристаллы, упоминавшиеся здесь.

Во второй группе выделите из коллекции различные минеральные агрегаты – они в природе крайне разнообразны и часто встречаются:

- **зернистые**, представляют собой скопление минеральных зерен. Из коллекции отберите зернистый агрегат из роговой обманки, кварца и апатита и др. Рассмотрите их и определите, чем они отличаются и что общего у них;
- **волокнистые** (асбест – XIII) – найдите его по списку в коллекции и убедитесь, что это агрегат из плотно расположенных мягких волокон (горный лен) с шелковистым блеском. Внимательно рассмотрите этот вид блеска, потренируйтесь для его распознавания, чтобы не путать с другим блеском, и запомните. Волокнистые минералы всегда переливчатые, подобно шелку, отсюда блеск шелковистый;
- **лучистые** (актинолит – XII) – агрегаты из удлиненных кристаллических лучиков зеленого цвета, сравните этот лучистый агрегат с волокнистым агрегатом и запомните формы этих минералов, обратите внимание на блеск лучиков;
- **землистые** (каолинит – XIV) и др. Помните, после удара молотком землистые минералы рассыпаются в порошок, который остается под молотком, а зернистые разлетаются на куски.

Здесь надо знать характерные формы одиночных кристаллов минералов (в изометрии) и агрегаты по видам. Обратите внимание, на то, чем агрегаты отличаются между собой и от одиночных кристаллов. Отметьте в тетради различные формы кристаллов (в изометрии) и виды агрегатов, приведенных в этом разделе.

Но, кроме этих агрегатов, приведены еще другие в кристаллографии (I часть) – рассмотрите их.



# ОПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МИНЕРАЛОВ

## ЦВЕТ

При определении цвета минералов учебной коллекции вначале разделите их на две характерные группы:

1. Светлоокрашенные – кварц и все полевые шпаты, фельдшпатоиды, корунд и др.
2. Темноокрашенные минералы – слюда (в том числе зеленый мусковит), амфиболы, пироксены, оливин, темно-серый кальцит тоже относят к темноокрашенным минералам. Сравните их между собой.

Поните, что цвет минералов является существенным отличительным признаком только у густоокрашенных минералов с постоянным химическим составом, которые всегда имеют одну и ту же окраску, т.е. обладают постоянным собственным цветом и никогда его не изменяют. Это относится и к минералам с металлическим блеском, таким как пирит, галенит, халькопирит и др., а также некоторым минералам с неметаллическим блеском – сера, малахит, азурит и др. Окраска у этих минералов зависит от химического состава и называют ее собственной. Для слабоокрашенных минералов цвет не является существенным признаком. Если интенсивность окраски в природе зависит от примеси, ее называют примесной; если от нарушения внутренней структуры или отражения от включений – ложной.

Для указанных здесь и других минералов рабочей коллекции определите окраску и занесите результаты определения в рабочую тетрадь (например, кварц; азурит; киноварь; сера). Но следует отметить, что для некоторых минералов более существенным признаком является не окраска их, а цвет черты, т.к. окраска минералов изменчива, непостоянна и для определения минерала ею следует пользоваться совместно с другими свойствами.

## ЦВЕТ ЧЕРТЫ

Для определения цвета черты минерала используйте фарфоровую пластинку («бисквит») или керамическую плитку, ее неглазурованную поверхность, по которой проводят острым краем минерала, с не слишком большим усилием. При этом минерал будет крошиться и одновременно растираться, превращаясь в окрашенный в тот или иной цвет порошок. По его окраске и судят о цвете черты минерала.

Убедитесь практически в том, что бесцветные или светлоокрашенные минералы дают лишь светлоокрашенную черту (белую, серую) или не дают ее совсем, а только царапают плитку.

Рудные минералы дают как темную черту, совпадающую с цветом минерала (магнетит), так и не совпадающую с цветом минерала (гематит, пирит, лимонит). Определите цвет черты для указанных здесь минералов и отметьте результаты определения в тетрадах.

## ПРОЗРАЧНОСТЬ

К *прозрачным* минералам учебной коллекции относите только те, которые пропускают беспрепятственно лучи света и через них, как сквозь чистое стекло, можно отчетливо рассматривать окружающие предметы (горный хрусталь, исландский шпат, гипс пластинчатый). Убедитесь, хорошо ли они пропускают свет? Все ли видно сквозь них?

К *полупрозрачным* минералам выделяйте только такие, которые в куске непрозрачны, а в очень тонких краях или пластинках (толщиной 1 мм) просвечивают (биотит, зеленый мусковит и др.). Проверьте это на указанных и других минералах коллекции.

*Непрозрачные* минералы даже в тонких пластинах (менее 1 мм) не просвечивают (рудные минералы – пирит, галенит, магнетит).

Определив степень прозрачности минералов учебной коллекции, полученные результаты отметьте в своей тетради и запомните принципы определения прозрачности, ее виды.

## БЛЕСК

Определение блеска обычно начинают после небольшой тренировки. А перед этим подбирают из коллекции минерал с чистой, ровной и гладкой поверхностью. После этого берут образец и направляют гладкой плоскостью навстречу потоку лучей света от естественного или искусственного источника освещения. Затем медленно поворачивают минерал для его максимального освещения влево или вправо от себя на небольшой угол. Внимательно рассмотрите, подобно чему блестит его хорошо освещенная поверхность.

После нескольких таких упражнений вы сможете минералы коллекции подразделить на две группы по типу блеска:

а) минералы с *металлическим блеском* подобны отполированной повер-

хности стали (галенит, гематит и др.). Среди минералов обратите внимание на отдельные чешуйки графита в образце, обладающие полуметаллическим блеском, который напоминает потускневшую от времени поверхность стали. Минералы с полуметаллическим блеском в отдельную группу не выделяются. Определите самостоятельно блеск металлический и полуметаллический (металловидный). Результаты отметьте в тетради.

б) *нематаллический блеск* довольно разнообразен. Самым распространенным блеском является *стеклянный* – гипс пластинчатый, кальцит, горный хрусталь; может встречаться *шелковистый* – асбест, гипс волокнистый – селенит; *матовый* – халцедон; *перламутровый* – тальк, слюда; *жирный* – кварц, нефелин и др. Проверьте указанные блески на конкретных образцах. Опишите их в тетради с обязательным указанием минералов, к которым они относятся. Научитесь определять блеск у других минералов.

При определении различных видов блеска обращайтесь внимание: зависит или не зависит блеск от окраски (цвета) минералов, а его интенсивность – от характера и чистоты поверхности.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

### ТВЕРДОСТЬ

Определение твердости минералов с помощью 10-балльной шкалы Мооса или предметов-заменителей базируется на одном и том же положении: *каждый последующий минерал шкалы или предмет-заменитель оставляет царапину на всех вышестоящих замесителях или минералах-эталонах.*

Минералы или предметы-заменители с одинаковой твердостью царапают друг друга.

При исследовании твердости минералов необходимо удалять с поверхности оставшийся порошок и лишь тогда устанавливать наличие или отсутствие царапины.

Принцип определения относительной твердости следующий. Вначале у минерала выбирают не задетую выветриванием, без пленок, чистую, гладкую поверхность, например спайность или ровный участок свежего излома.

Определение твердости исследуемого минерала сводится к выявлению двух соседствующих в шкале Мооса эталонных минералов (или их замесителей), из

которых первый царапается изучаемым минералом, а второй и исследуемый минерал царапают друг друга, значит, их твердость одинакова. В противном случае исследуемый минерал получил бы промежуточную твердость между двух значений, соседствующих в шкале минералов – эталонов.

Примеры. Исследуемый минерал царапает гипс ( $H = 2$ ), а его царапает кальцит ( $H = 3$ ), и сам кальцит чертится минералом (царапают друг друга); твердость у них одинакова – 3. И наоборот, исследуемый минерал царапает гипс ( $H = 2$ ), а его царапает рядом стоящий в шкале кальцит ( $H = 3$ ), но минерал кальцит не царапает. Значит, твердость исследуемого минерала находится между твердостью 2 и 3, т.е. она равна 2,5. Половину всегда добавляют к меньшей твердости.

При определении твердости минералов необходимо учитывать анизотропию – зависимость твердости от направления. В этом можно удостовериться на пластинчатом минерале – кианите (синоним – дистен, с древнегреческого «двойкотвердый»). Вдоль удлинения твердость его находится между 4–5 ( $H = 4,5$ ), апатит его царапает, а флюорит нет. Перпендикулярно удлинению твердость дистена находится между 6–7 ( $H = 6,5$ ), кварц (твердость  $H = 7$ ) царапает, полевой шпат (твердость  $H = 6$ ) – нет. Этот пример лишний раз доказывает, что твердость зависит от строения минералов. Чем гуще усеяны атомами плоскости, тем большей твердостью будут отличаться грани, и наоборот.

Как определить твердость минерала, если нет шкалы Мооса? В этом случае выручат предметы-заменители шкалы Н.К. Разумовского (табл. 8). В обоих случаях твердость измеряется числом твердости. Для определения твердости можно использовать и другие предметы (кроме шкалы предметов-заменителей), если твердость их известна. Например, минерал пишет на бумаге, не царапая ее, – твердость минерала равна единице. Если минерал чертится ногтем ( $H = 2,5$ ), а сам не оставляет царапины на ногте, то твердость минерала 2. Если ноготь не оставляет царапины на минерале, но стальной нож своим кончиком царапает его без заметных усилий, то твердость – 3. Высококачественные бритвенные лезвия обладают твердостью – 6,5 и т.д.

В природе преобладают минералы с твердостью до 7. Такие минералы чертятся напильником, сами они тоже чертят, т.е. твердости у них одинаковы. Минералы с твердостью 8 чертятся победитом, корундом, но сами не царапают. Победит царапает корунд, а корунд – победит, значит твердость у них одинаковая ( $H = 9$ ). Алмаз царапается только алмазом ( $H = 10$ ).

Высокая твердость алмаза делает его незаменимым в качестве эффективнейшего абразива в различных областях народного хозяйства.

Используя шкалу твердости Мооса и шкалу Разумовского, самостоятельно определите твердости некоторых минералов учебной коллекции. Результаты определений занесите в тетрадь. Запомните способы определения твердости и выучите применяемые шкалы Мооса и Разумовского.

## СПАЙНОСТЬ

Мы рассмотрели теоретически пять степеней спайности, играющих очень важную роль в нашей жизни. Как их надо различать? Для этого надо знать характеристику каждой из них. Кроме того, спайность надо наблюдать на свежем изломе минерала. У минерала зернистого строения спайность следует определять у каждого зерна в отдельности (вдоль и поперек). У порошковатых и землистых разновидностей минералов спайности нет. Спайность – характерное свойство кристаллических минералов, но степень проявления ее различна.

По совершенству поверхности от раскола выделяют:

- **Весьма совершенную спайность**. Она определяется тем, что минерал легко раскалывается или характернее расщепляется на отдельные пластинки, листочки с образованием гладких, ровных поверхностей (биотит, мусковит, гипс пластинчатый и др.). Получить ровный излом иначе, чем по направлению спайности, невозможно, минералы можно только сломать. Познакомьтесь с весьма совершенной спайностью на примере образцов биотита и мусковита и др.
- **Совершенная спайность** характерна тем, что ее легко определить по обломкам с ровными плоскостями, которые получаются при раскалывании минерала по спайностям и не отличаются по форме от формы исходного (до раскола) образца (каменная соль – кубический галит – дает обломки в форме мелких кубиков, а исландский шпат ромбоэдрической формы при разломе образует мелкие обломки той же ромбоэдрической формы), те и другие с гладкими поверхностями совершенной спайности.

Рассмотрев эти минералы, установите, в скольких направлениях у них идет совершенная спайность, результаты отметьте в тетради.

- **Средняя, или явственная спайность** – обнаруживается при расколе минерала на обломках, ограниченных, как ровными, гладкими

поверхностями спайности, так и неровными поверхностями излома по случайным направлениям (роговая обманка – рассмотреть среднюю спайность в агрегатном скоплении можно только в каждом зерне в отдельности, тоже в авгите, и лучше она проявлена в ортоклазе).

- На этих минералах, на отдельных их зернах, кроме ортоклаза, где она лучше видна, внимательно отыщите маленькие гладкие поверхности – это *спайности* и неровные – *отдельности*. Полученную информацию занесите в рабочую тетрадь.
- *Несовершенная спайность* граничит с отсутствием спайности, т.к. обнаруживается с большим трудом в виде очень небольших редких ровных поверхностей на обломках минерала среди господствующих неровных поверхностей (оливин, сера, рудные минералы). На образцах, указанных здесь, убедитесь в характере несовершенной спайности. Мелкие фрагменты плоскостей спайности всегда ровные и блестят.
- *Весьма несовершенная спайность* – ее фактически нет, многие авторы ее не выделяют, т.к. минералы раскалываются по случайным направлениям и на обломках нет гладких поверхностей (кварц, пирит и др.).

Убедитесь в отсутствии спайности у кварца и пирита. Отметьте это в рабочей тетради. В целом отметим, что спайность может проходить в одном (слюда), двух (полевые шпаты), трех (галит, кальцит), четырех (флюорит) и шести (сфалерит) направлениях.

## ИЗЛОМ

*Излом* – вид поверхности от раскола минерала. На практике на образцах учебной коллекции познакомьтесь со следующими видами излома:

- *ровный, гладкий* излом – это спайность (мусковит и др.);
- *неровный* (зазубренный) излом (кварц, у слюды не по спайности);
- *ступенчатый* излом – наблюдается чаще всего тогда, когда он образуется по направлениям взаимно перпендикулярных спайностей (ортоклаз, кальцит др.) или одно из них проходит под небольшим углом (микроклин);
- *занозистый* излом – при расколе минерала образуются обломки или выступы, напоминающие занозы (гипс-селенит, актинолит и др.);
- *раковистый* излом, напоминающий створку раковины, с выпуклыми и вогнутыми участками с концентрическими «ребрами» (магнетит аморфный, халцедон);

- **зернистый** излом – при расколе минерала на всех неровных поверхностях видны зерна, которые у разных минералов имеют различный размер (авгит, апатит);
- **землистый** излом – под ударом молотка минерал рассыпается и продукты не разлетаются в стороны, а остаются под молотком (каолинит).

Результаты излучения видов излома с указанием минералов занесите в тетрадь и запомните внешний вид каждого из них.

## ХРУПКОСТЬ

Если минерал при ударе молотком с шумом разлетается на несколько кусков, а при царапании его поверхности острием ножа не крошится, значит, имеем дело с хрупким минералом (опал, галит и др.). Если минерал рассыпается в порошок, который останется под молотком, то он называется рассыпчатым. Отметьте эту информацию в рабочей тетради и, взглянув на коллекцию еще раз, запомните, что почти все минералы хрупкие.

## КОВКОСТЬ

Ряд минералов – самородных элементов – при ударе молотком получают вмятину, а при последующих ударах куются в тонкие пластинки без разрыва сплошности – это ковкие минералы. Если на поверхностях минералов от острия ножа остается гладкая блестящая черта – это признак того, что это минералы ковкие (золото, самородная медь и др.). Хрупкость, рассыпчатость и ковкость характеризуют **связность минерала**. Запишите в тетрадь эти сведения и запомните.

## ВЯЗКОСТЬ

**Вязкость** – величина энергии, поглощенная минералом до начала раскола (разрыва), по данным исследователей, всегда выше у поликристаллических агрегатов (горных пород), чем у отдельных минералов.

Минералы, прочно связанные друг с другом (любой зернистости), при ударах молотком получают на поверхности неглубокие, небольшие вмятины, но раскалываются с очень большим трудом. Характерно, что в месте удара и около него трещинок нет, при царапании порошок не образуется (агрегаты зерен авгита, роговой обманки, халцедон – скрытокристаллический агрегат кварца и др.).

## ПЛОТНОСТЬ (удельный вес)

В полевых условиях и на практических занятиях определение плотности минералов без приборов и тяжелых жидкостей проводите взвешиванием на руках следующим образом:

- подберите из коллекции минералы сравнительно одинаковой величины: легкие (сера, гипс), средние (кальцит, магнезит) и тяжелые (магнетит, галенит);
- возьмите сначала легкие образцы, взвешайте их, затем средние и тяжелые; после поменяйте порядок (легкий – средний, средний – тяжелый, легкий – тяжелый) и повторите взвешивание;
- подобным же способом определите плотность других одинаковых по объему образцов из учебной коллекции, сравнивая ее с плотностью уже взвешенных минералов.

Результаты определений плотности у образцов внесите в рабочую тетрадь.

## ОСОБЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

На практических занятиях определите следующие особые свойства минералов:

1. **Магнитность** – выявляется взаимодействием минерала с магнитом, намагниченной иглой или стрелкой компаса, которые к нему притягиваются (магнетит).

Проверьте это практически.

2. **Реакция минерала с 10% соляной кислотой.** При попадании кислоты на его поверхность она бурно «вскипает» – выделяются пузырьки углекислого газа (кальцит), доломит вскипает в порошке, магнезит вскипает только от горячей кислоты. Это легко проверить на кальците холодной 10% соляной кислотой HCl, для доломита надо приготовить из него тонкий порошок и капнуть ту же кислоту.
3. **Водорастворимость** (галит, гипс).
4. **Вкусовые качества** (соляной вкус у галита).
5. **Двойное лучепреломление** – поставьте минерал на текст, и вы увидите, что он раздваивается (совершенно прозрачный кристалл исландского шпата).



6. *Электризация* минерала – хорошо обнаруживается при трении его шерстяным материалом или кожаным изделием, после чего к нему притягиваются мелкие кусочки бумаги (сера) и др.

Выявленные особые свойства вместе с названиями минералов опишите в тетради и запомните, т.к. они помогут вам при самостоятельной диагностике минералов.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛОВ

После предыдущей работы, когда студенты приобретали первые знания, навыки и умение определять только физические свойства (внешние признаки) на образцах, можно перейти к систематическому определению и описанию образцов минералов. Студентам выдается все, что было на предыдущем занятии, добавляется учебное пособие или методические указания по определению минералов и каждому – таблица с описательным примером (табл. 12) для продолжения заполнения своих результатов.

Не выдается карточка с названиями минералов. Их следует определить самому студенту с помощью полученных собственных результатов и простейшего определителя.

Для обнаружения внешних физических свойств минералов существуют капитальные определители. Поскольку в технических вузах на изучение минералов выделяется небольшое количество времени, для ускоренного определения выданных образцов и сверки полученных результатов составлен *простейший определитель* (табл. 11).

Определитель составлен по принципу последовательного выявления невооруженным глазом (макроскопически) наиболее важных внешних признаков минералов: блеска, твердости, цвета, цвета черты, спайности, плотности, форм образования. Так как мы не ставили задачу, чтобы студент полностью определил все возможные внешние свойства у минералов, а только важнейшие, то остальные он дополнит из данного учебного пособия.

Следует отметить, что многие минералы, образовавшиеся в разных условиях, имеют различный облик, что затрудняет определение даже наиболее распространенных минералов. В этом случае неоценимую роль сыграют в определении минералов цветные фотографии, отражающие облик реальных кристаллов и их агрегатов небольшой учебной коллекции.

На предыдущем занятии студенты познакомились с основными способами диагностики минералов, посмотрели, поопределяли их на образцах. Теперь эти способы ими практически применяются для определения и описания образцов на текущих занятиях.

С чего следует начинать определение минерала? Какие главные признаки лучше всего послужат для этого? Надо определить хотя бы несколько признаков, которые привели бы к группе по твердости, а затем и к названию минерала, содержащегося в ней.

1. Начинать можно с блеска, так как он относится к числу постоянных, стабильных, легко наблюдаемых и определяемых внешних признаков. Он хорошо проявляется на гранях, плоскостях спайности и на свежем изломе образца. Блеск – характерный диагностический признак для большинства минералов. Надо только практически научиться различать виды блеска: металлический, полуметаллический (металловидный), неметаллический: стеклянный, шелковистый, перламутровый, жирный, восковой, матовый, алмазный и др.

2. Твердость – подобно блеску очень важный диагностический признак. Благодаря твердости, минералы нашей небольшой коллекции разделились на семь самостоятельных групп, указаны пределы твердости и даже предмет или минерал, с помощью которых можно быстро определить твердость исследуемого минерала. Поскольку пределы твердости у минералов выбрали небольшими, твердость надо определять с точностью до 0,5 (балла или единицы). Минералы, у которых твердость колеблется в определенном пределе, указаны через тире, например, твердость 5–6, это зависит от свежести образца.

3. У темноокрашенных минералов важным диагностическим признаком является цвет черты. Цвет самого минерала редко может служить диагностическим признаком, поэтому его используют совместно с другими признаками.

4. Плотность (взвешивание минералов на руке) легко позволяет отнести минерал к пороодообразующим или рудным минералам. Рудные минералы всегда с высокой плотностью (тяжелые), блестящие и непросвечивающие.

5. Спайность и ее деление по совершенству поверхности может служить диагностическим признаком для определения минерала.

6. Определение магнитности – для отдельных минералов важный, определяющий признак.

7. Взаимодействие с соляной кислотой HCl и др. признаки.

Сумма диагностических признаков обязательно поможет определить исследуемый минерал, и тем точнее, чем тщательнее они были выявлены.

Для облегчения выявления простейших признаков для каждого минерала в определителе приводится краткая их характеристика, чтобы можно было сравнить с изучаемым образцом. Сведения о типе, классе, подклассе и группе, к которым относится минерал, можно найти в кристаллохимической классификации (табл. 9, с. 112).

Для краткости описание минералов производится в табличной форме (табл. 12). Сумма выявленных признаков у исследованного минерала приведет к определенной группе по твердости, а внутри ее – к определенному минералу. Затем все полученные признаки заносятся в таблицу, а недостающие сведения необходимо дополнить из учебного пособия или методических указаний.

Таблица 11

**Схематический определитель минералов**

<i>№ п/п в группе</i>	<i>Описание свойств</i>	<i>Минерал</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<b>I группа минералов с твердостью до 2 включительно</b> (чертятся ногтем)		
1	Блеск жирный или восковой, на ощупь мыльный. Цвет белый, зеленоватый, голубоватый, желтоватый, черта белая, листочки гибкие, но не упругие, чертится ногтем	Тальк
2	Полуметаллический и матовый блеск, черта черная. Цвет черный, серовато-черный, пачкает руки и пишет на бумаге, жирный на ощупь, легкий. Плотность 2	Графит С
3	Блеск матовый, жирный на ощупь, строение землистое. Цвет белый с различными оттенками. Набухает при увлажнении	Монтмориллонит
4	Матовый или жирный блеск, на ощупь – землистый. В воде набухает. Цвет – бесцветный, белый с голубым, зеленоватым и др. оттенками, желтый, черта белая	Каолинит
5	Блеск мутно-стеклянный или жирный. Слюдopodobный. Цвет желтовато-бурый, золотистый, при нагревании увеличивает объем	Вермикулит
6	На сколах блеск жирный, на гранях – алмазный, черта светло-желтая, слабая. Цвет желтый, до желто-бурого, редко – черный (из-за примесей), излом раковистый, горит	Сера S
7	Блеск перламутровый у пластинчатого, стеклянный у мелко зернистого минерала. Цвет – бесцветный, белый, красноватый. Пластинчатый прозрачный, как чистое стекло. Эталонный минерал шкалы Мооса	Гипс
8	Шелковистый, атласный блеск, черта белая. Цвет розовый, белый. Форма волокнистая, минерал легкий. Плотность 2, 3	Гипс-селенит
9	Стеклянный или жирный блеск, черта белая или желтоватая. Цвет – бесцветный, белый, серый, синий, желтый. Соленый на вкус	Галит

1	2	3
<b>II группа минералов с твердостью от 2 до 3</b> (чертятся медным гвоздем из чистой медной проволоки)		
1	Блеск алмазный. Плотность 8–8,1. Цвет от малиново-красного до коричневатого-красного, черта ярко-красная, полупрозрачный, хрупкий минерал	Киноварь
2	Блеск стеклянный или перламутровый, серебряный. Бесцветный, белый, ярко-зеленый, нехрупкий, весьма совершенная спайность, пластинчатый, средней плотности	Мусковит
3	Перламутровый на плоскостях спайности, блеск стеклянный. Цвет черный и бурый с различными оттенками, шестиугольная форма, таблитчатый, нехрупкий, гибкий, весьма совершенная спайность	Биотит
4	Блеск сильный металлический. Плотность 7,4–7,58. Цвет свинцово-серый, черта черновато-серая, до черной, непрозрачный, очень хрупкий, излом ступенчатый, спайность весьма совершенная	Галенит
5	Шелковистый блеск, волокнистый минерал. Цвет зеленовато-желтый с золотистым отливом, в распушенном виде белый	Хризотил-асбест
6	Блеск стеклянный или жирный, восковой. Черта зеленоватая. Цвет от желто-зеленого до темно-зеленого, пятнистоокрашенный минерал, непрозрачный, излом раковистый	Серпентин
7	Стеклянный блеск, матовый – у зернистых масс. Вскипает от 10% соляной кислоте HCl. Цвет белый, серый с голубым и др. оттенками, желтый. Эталонный минерал шкалы Мооса	Кальцит
8	Блеск сильный стеклянный. Вскипает от 10% HCl. Водянисто-прозрачный. Обладает двойным лучепреломлением, ромбоэдрическая форма	Исландский шпат
<b>III группа минералов с твердостью от 3 до 4</b> (не чертятся медным гвоздем, чертятся железным гвоздем)		
1	Блеск стеклянный, на плоскостях спайности перламутровый. Цвет белый с голубоватым оттенком, сероватый и розовый, средней плотности	Ангидрит
2	Стеклянный, иногда перламутровый блеск. Цвет белый, серый, светло-зеленый, желтый, плотность 4–4,3 (тяжелый шпат), черта белая	Барит
3	Сильный металлический блеск. Цвет желтый, с темно-желтой побежалостью, черта черная с зеленоватым оттенком. Плотность 4,2	Халькопирит
4	Блеск стеклянный и шелковистый. Цвет ярко-зеленый, черта бледно-зеленая. Прекрасный поделочный материал	Малахит
5	Стеклянный или перламутровый блеск. Цвет желтый, темно-серый и др. Вскипает только в порошке или в подогретой 10% HCl	Доломит
6	Блеск стеклянный. При нагревании легко плавится. Цвет зеленый, фиолетовый, синий и др., черта белая. Чертится стеклом. Эталонный минерал шкалы Мооса	Флюорит
<b>IV группа минералов с твердостью от 4 до 5</b> (чертятся стеклом)		
1	Стеклянный блеск. Вскипает от нагретой HCl. Цвет – бесцветный, белый, серый с различными оттенками, от мелко- до крупнозернистых масс	Магнезит
2	Блеск матовый, излом раковистый, облик фарфоровидный, белый. Плотный, незернистый, т.к. аморфный	Магнезит

1	2	3
3	Блеск матовый или полуметаллический. У натечного – твердость 5, цвет – темно-бурый. У землистого – лимонно-желтый. Твердость 1–2. Черта желто-бурая, бурая	Лимонит
4	Стеклянный или жирный блеск, в зернистой массе – сахаровидный. Цвет бесцветный, белый, зеленый, голубой и др. Чертится стальным ножом и ортоклазом	Апатит
<b>V группа минералов с твердостью от 5 до 6</b> (чертятся стеклом или стальным ножом)		
1	Блеск стеклянный до перламутрового. Цвет – бесцветный, белый, серый, чаще – зеленый, желтый, бурый – за счет примесей. Черта белая, непрозрачный, излом чаще ступенчатый, спайность совершенная	Энстатит
2	Блеск сильно стеклянный, черта светлая, серо-зеленая. Цвет черный, зеленовато- или буровато-черный, непрозрачный, плотность средняя, излом ступенчато-неровный, спайность совершенная	Авгит
3	Стеклянный блеск на гранях, жирный на изломе. Цвет серый, с голубоватым, желтоватым, зеленоватым оттенком, черта – белая, непрозрачный, излом неровный	Нефелин
4	Металлический блеск. Цвет черный, черта черная, плотность 4,9–5,9, в кристаллах октаэдрический, в сплошных массах зернистый, магнитный	Магнетит
5	Блеск металлический, плотность 5,0–5,2. Цвет черный, слабо красноватый, черта вишнево-красная или бурая. Спайности нет	Гематит
6	Стеклянный блеск. Цвет зеленый, минерал игольчато-лучистый (лучистый камень), цвет черты – белый, непрозрачный, излом занозистый, спайность совершенная в одном направлении	Актинолит
7	Блеск стеклянный, черта зеленоватая или бурая. Цвет зеленый темных тонов до черного, непрозрачный, плотность средняя, излом занозистый с выступами, спайность совершенная	Роговая обманка
<b>VI группа минералов с твердостью от 6 до 7</b> (чертятся кварцем)		
1	Блеск стеклянный, спайность совершенная под углом 90° (прямораскальывающийся). Цвет светло-розовый до красного, черта белая, непрозрачный, хрупкий, излом ступенчатый, неровный, средней плотности	Ортоклаз
2	Блеск жирный или матовый, минерал аморфный, бесцветный, примесями окрашивается в различные оттенки желтого, бурого, зеленого и черного цветов	Опал
3	Блеск стеклянный, черта белая. Цвет красный, бурый, голубовато-зеленый (амазонит). При расколе отклоняется на небольшой угол от 90° (косораскальывающийся), излом ступенчатый, по спайности ровный	Микроклин
4	Сильный металлический блеск. Плотность 4,9–5,0. Зернистые массы или кристаллы кубической или октаэдрической формы. Цвет латунно-желтый, черта зеленовато-черная, хрупкий	Пирит
5	Стеклянный блеск, черта белая, цвет белый, сероватый, зернистые массы непрозрачны, плотность средняя, излом неровный	Альбит
6	Блеск стеклянный. Цвет пепельно-серый, желтоватый, бесцветный. Цвет черты – белый, спайность совершенная в двух направлениях, плотность средняя, хрупкий. Излом неровный	Андезин

1	2	3
7	Стеклянный или перламутровый блеск. Цвет серый до черного, местами с синим отливом – иризация (свечение), совершенная спайность в одном направлении, средняя плотность	Лабрадор
8	Блеск стеклянный, на плоскости спайности перламутровый. Цвет бесцветный, белый, голубоватый, черта – белая, средней плотности, излом неровный	Анортит
9	Стеклянный или жирный блеск, черты не дает. Цвет бесцветный, желтый с зеленоватым оттенком. В HCl порошок разлагается в виде хлопьев	Оливин
10	На гранях блеск стеклянный, жирный – на изломе. Обычно молочно-белый, у разновидностей – черный (морион), дымчатый, фиолетовый (аметист), водяно-прозрачный и др. Спайности нет, черту не дает, излом раковистый	Кварц
<b>VII группа минералов с твердостью выше 7</b> (не чертятся кварцем, чертятся победитом)		
1	Сильный стеклянный блеск, черты не дает. Цвет – бесцветный, желтый, голубой, фиолетовый, зеленый, розовый. Эталонный минерал шкалы Мооса	Топаз
2	Блеск стеклянный, черты не дает. Цвет серый, синий (сапфир), красный (рубин), черный (наждак), чертит бисквит, кварц, форма – бочковидная. Эталонный минерал шкалы Мооса	Корунд

*Примечание:* тип, класс, подкласс, группу определяемого минерала смотрите в кристаллохимической классификации, табл. 9, с. 112.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как определить три группы внешних форм минералов в изометрии?
2. Каким способом можно определить типы агрегатов?
3. У каких минералов окраска собственная? Какие существуют основные причины изменения окраски?
4. Каким способом определяют цвет черты?
5. Какие минералы не дают черты?
6. Каким способом определяют прозрачность?
7. Назовите виды прозрачности?
8. Как делят минералы по блеску?
9. Как определить блеск?
10. Назовите виды неметаллического блеска?
11. Каким способом у минерала определяют твердость?
12. Назовите, какие минералы входят в шкалу Мооса?
13. Сколько степеней твердости можно определить минералами – эталонами Мооса?
14. Как определить твердость, если шкалы Мооса нет?
15. Какие предметы составляют шкалу Разумовского?
16. Сколько степеней спайности можно определить у минералов?
17. У каких минералов спайности вообще нет?
18. Каким способом можно получить излом?
19. Какие основные виды изломов выделяются на кристаллы?
20. Чем спайность отличается от излома?
21. Какие существуют на минералах виды изломов?
22. Каким способом можно определить хрупкость? Ковкость? Вязкость?
23. Как определить относительную плотность у минералов в поле?
24. Каким способом определяют особые свойства минералов?

## ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Для описания минералов в качестве домашнего задания выдается перечень минералов для трех вариантов: А, Б, В.

Группа делится по списку на три равные части, сверху вниз.

Вариант «А» описывают студенты, вошедшие в I часть списка (6–8 студентов, в зависимости от численности), вариант «Б» описывают студенты, составляющие вторую часть, и вариант «В» описывают студенты третьей части.

Минералы для описания по вариантам к домашнему заданию:

<b>А</b>	<b>Б</b>	<b>В</b>
Сера	Графит	Пирит
Галит	Галенит	Флюорит
Кварц	Опал	Барит
Магнетит	Гематит	Кальцит
Доломит	Гипс	Магнезит
Оливин	Ангидрит	Авгит
Актинолит	Роговая обманка	Тальк
Мусковит	Лабрадор	Биотит
Серпентин	Авгит	Монтмориллонит
Ортоклаз	Каолинит	Микроклин
Нефелин	Альбит	Анортит
Каолинит	Хризотил-асбест	Нефелин
Роговая обманка	Монтмориллонит	Доломит
Пирит	Кварц	Пироксен
Кальцит	Пирит	Сера

Описание ведется в табличной форме (табл. 12). По окончании описания работа сдается на проверку и защищается. Выполнение ее обязательно. После этого вне сетки часов расписания студенты приходят готовиться к коллоквиуму и сдают минералы.

Описание минералов (15 образцов) и коллоквиум служат основанием для простановки зачета по лабораторным работам.



## Описания минералов

<i>Наименование</i>		<i>№ п/п</i>	<i>Пример</i>	
<i>Название минерала и его формула, группа и класс</i>		1	1. Ортоклаз $K[AlSi_3O_8]$ , группа Полевые шпаты, класс силикаты	
<i>Сингония</i>		2	Моноклинная	
<i>Свойства минералов</i>	<i>Морфологические</i>	<i>Форма (облик)</i>	3 Призматическая или зернистая	
	<i>Оптические</i>	<i>Цвет и цвет черты</i>	4 Светло-розовый, буровато-желтый, красновато-белый, черновато-белый. Белая	
		<i>Блеск и прозрачность</i>	5 Стекланный. Непрозрачный	
	<i>Механические</i>	<i>Твердость (баллы)</i>	6 6,0	
		<i>Спайность и излом</i>	7 Совершенная в 2 направлениях под углом $90^\circ$ . Ступенчатый, неровный	
		<i>Хрупкость</i>	8 Хрупкий	
		<i>Плотность (г/см<sup>3</sup>)</i>	9 2,56–2,58	
	<i>Растворимость и особые свойства</i>		10	В $HNO_3$ , особых свойств нет
	<i>Устойчивость к выветриванию</i>		11	Среднеустойчив, переходит в глину (каолинитовую)
	<i>Происхождение и месторождения</i>		12	Магматическое, метаморфическое, пегматитовое. Урал, Забайкалье, Украина
<i>Применение</i>		13	Сырье для стекольной, керамической, промышленности стройматериалов	
<i>В каких породах встречается</i>		14	Граниты, пегматиты, гнейсы и др.	

Форма описания минералов в кабинете инженерной геологии и дома одинакова.

## ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛОВ

### I. ПРОСТЫЕ ВЕЩЕСТВА

#### КЛАСС САМОРОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Этот класс насчитывает до 50 минералов в виде отдельных элементов, находящихся в природных земных процессах в самородном состоянии. Их называют еще простыми веществами, или элементарными. Самородные элементы могут быть как металлы (золото, серебро, платина), полуметаллы (мышьяк, сурьма, висмут), так и неметаллы (графит, сера, алмаз). Рассмотрим серу и графит.

#### СЕРА (САМОРОДНАЯ СЕРА)

**Название** – возможно происходит от древне-индийского (санскритского) слова «сира» – «светло-желтый».

**Формула** – S.

**Сингония** – у серы три природных модификаций: α-сера (ромбическая), β- и γ-сера (обе моноклинные). Облик правильных кристаллов – удлиненно-пирамидальный или усеченно-пирамидальный, дипирамидальный, таблитчатый (рис. 65). Минерал в кристаллах достигает нескольких десятков сантиметров. Чаще встречается в виде друз (II, рис. 2). Обычно встречается в зернистых (II, рис. 3), порошковатых, плотных землистых массах, шаровых и почковидных выделениях, корочках, налетах, натеках – продуктах вулканических возгонов.

**Цвет** – у чистой серы светло-желтый, лимонный до желто-бурого, очень редко черный (из-за примесей и загрязнений).

**Цвет черты** – белый, до слабого светло-желтого, еле заметного.

**Блеск** – на гранях кристаллов алмазный, жирный, восковой на изломе.

**Прозрачность** – полупрозрачна, в зернистой массе непрозрачна, в особо чистых кристаллах прозрачна.

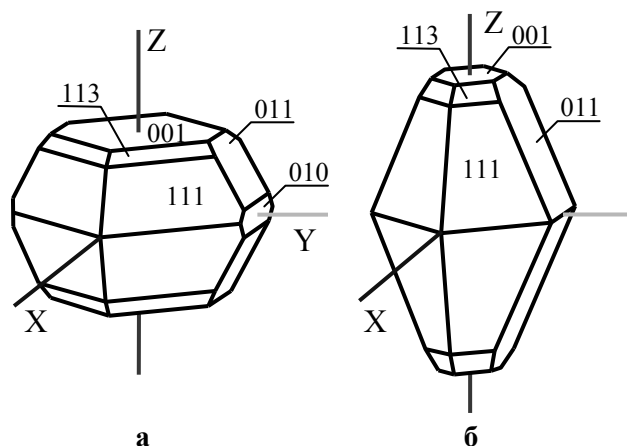


Рис. 65. Кристаллы серы:  
а – усеченный дипирамидальный,  
б – удлиненный дипирамидальный

*Твердость* – 1–2 (низкая).

*Плотность* – 2,07.

*Хрупкость* – очень хрупкая.

*Излом* – раковистый, неровный, землистый, зернистый.

*Спайность* – практически ее нет.

### **Диагностические признаки**

*Особые свойства* – сера, в основном, имеет желтый, реже желто-бурый цвет, низкую твердость, хрупкость, способна гореть и загорается от спички. Горит голубым пламенем при температуре 270 °С с образованием сернистого газа SO<sub>2</sub> и резким неприятным запахом, имеет низкую температуру плавления (113 °С). При трении электризуется и заряжается отрицательно. При выветривании слабоустойчива, легко окисляется и образует серную кислоту H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, из сульфатов (гипс).

*Химические свойства* – растворима в азотной кислоте HNO<sub>3</sub> с выделением паров SO<sub>2</sub>, в бензоле и эфире, в воде и других кислотах не растворяется, но растворяется в сероуглероде CS<sub>2</sub>, скипидаре, керосине.

**Происхождение** – в основном образуется из вулканических газов на стенках кратеров вулканов (Этна, Везувий), иногда выделяется в очень большом количестве (в Японии, на острове Хонсю, месторождение имеет запасы чистой серы 50 млн т), биогенно-осадочное. В последнем образовании серы связывают с анаэробными бактериями, выделяющими сероводород, неполное окисление которого приводило к выпадению серы. Кроме этих типов, сера образуется за счет разложения сернистых соединений металлов (например, пирита) и гипсоносных толщ пород, встречается в доломитах и мергелях в виде вкраплений. Выделяется с водой горячих сероводородных источников (например, около выходов гейзеров в Йеллоустонском парке в США и др.)

**Месторождения** – Поволжье, Средняя Азия, Урал, Курильские острова и др.

**Применение** – используется для производства серной кислоты (около 50% добытой самородной серы), сульфат – целлюлозы (около 25%), необходима она для отбеливания, получения искусственного волокна, азотистых соединений. Применяется сера также для борьбы с сельскохозяйственными вредителями (10–15%), в целлюлозно-бумажной, кожевенной, резиновой промышленности (вулканизация каучука), медицине, в производстве взрывчатых веществ – пороха и спичек, красок, пластмасс, стекла, цемента, очистки нефти. Низкая температура плавления серы позволяет добывать ее из глубоко залегающих осадочных пород: под высоким давлением в скважину закачивается горячая вода, сера расплавляется и скапливается внизу. Затем под действием сжатого горячего

пара, подаваемого по тонкой внутренней трубе, она извлекается наружу по другой внешней трубе большого диаметра.

## ГРАФИТ

Существуют в природе две природные формы самородного углерода – алмаз и графит. По своей структуре и физическим свойствам эти два минерала представляют собой пример наиболее яркого контраста среди полиморфных модификаций каких-либо других веществ.

**Название** – от греч. «γράφο» – «пишу».

**Формула** – С – самородный элемент – углерод.

**Сингония** – гексагональная. Правильные формы кристаллов крайне редки: шестиугольные пластинки, таблички (рис. 66; II, рис. 4).

Чаще всего встречается в тонкочешуйчатых или пластинчатых агрегатах (II, рис. 5, 4), плотных, землистых массах, содержащих значительное количество примесей (более 10%).

**Цвет** – от серо-стального до черно-стального, меняющийся от примесей.

**Цвет черты** – черная, блестящая или свинцово-серая.

**Блеск** – сильный металловидный (у кристаллов), матовый – в тонкоагрегатных обособлениях.

**Прозрачность** – непрозрачный минерал, но иногда в тонких краях чешуек просвечивает зеленовато-серым.

**Твердость** – 1–2, на плоскостях чешуек в отдельных случаях бывает гораздо больше.

**Плотность** – 2,09–2,23.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – отсутствует, так как чешуйчатый минерал.

**Спайность** – весьма совершенная в одном направлении параллельно пластинок.

Расстояние между слоями пластинок в 3 раза больше, чем толщина слоя из них.

### **Диагностические признаки**

Из внешних признаков следует учитывать, что графит – это очень мягкий минерал, низкая плотность, черный цвет, блеск матовый и полуметаллический (блеск сильно потускневшей стали), жирный на ощупь и легко чертит на бумаге, пачкает руки. Его могут получать искусственно из антрацита, при  $t = 2200\text{--}2500\text{ }^\circ\text{C}$ . Плавится при  $t = 3000\text{ }^\circ\text{C}$ , а сгорает при  $t = 3500\text{ }^\circ\text{C}$ . Является хорошим проводником электричества.

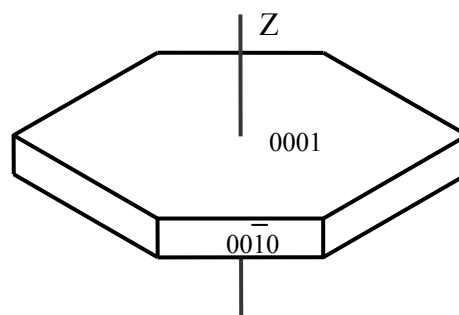


Рис. 66. Кристалл графита

*Химические свойства* – минерал низких, алмаз высоких давлений, в воде и кислотах не растворяются, поэтому они химически стойкие минералы.

**Происхождение** – графит типично метаморфический минерал, развит в сланцах, мраморах, гнейсах, кварцитах. Здесь он нередко составляет главный породообразующий минерал. Образуется за счет регионального метаморфизма каменных углей или битуминозных образований, магматический графит может возникнуть за счет магмы, ее первичных компонентов, в пегматитах, иногда гранитах. Графит – обычный акцессорный минерал железных метеоритов.

**Месторождения** – в Бурятии, Красноярском крае, на Среднем Урале (Мурзинка), в Восточных Саянах, в низовьях Енисея и др.

**Применение** – используется очень широко, можно сказать, что нет ни одной отрасли, где бы он в той или иной степени не применялся. Необходим графит главным образом в металлургической промышленности для изготовления огнеупорных тиглей и для покрытия поверхности литейных форм (с целью предохранения отливки от пригара формовочной земли). Графитовая жидкая смазка применяется при объемном прессовании деталей автомобилей. Штампы, обволакиваемые этим веществом, обеспечивают высокую чистоту поверхности стальных заготовок, что исключает их последующую обработку на шлифовальных станках. Он применяется для изготовления графитовых блоков «атомных котлов» и изготовления космической техники, графит высокой чистоты используется в атомной промышленности как замедлитель и отражатель нейтронов, как смазочное вещество (в тех случаях, когда из-за высокого нагрева нельзя применять масла) и в паровых котлах в качестве антинакипного средства. Используют этот минерал в производстве электродов и дуговых углей, около 4% добываемого графита лучших сортов идет на производство карандашей, черных красок, черной копировальной бумаги, типографской краски и китайской туши. Из графита получают искусственные алмазы.

## II. СЕРНИСТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ИХ АНАЛОГИ

### КЛАСС СУЛЬФИДЫ

Сульфиды (от лат. «sulphur» – «сера»). Это соединения металлов с серой (насчитывается 200 минералов). Их еще называют «соли сероводородной кислоты». По объему общее количество их в земной коре незначительно (менее 0,25%). Они не являются породообразующими минералами, но роль их в народном

хозяйстве очень велика, так как эти минералы служат для получения многих, очень необходимых элементов: медь из халькопирита, свинец из галенита, молибден из молибденита и т.д. Для них характерна большая плотность частиц, металлический блеск. Твердость от низкой до высокой. В зоне выветривания разрушаются. Примесь сульфидов в строительных материалах снижает их прочность и качество.

## ПИРИТ

**Название** – от греч. «πύρ» – «огонь», основано на свойстве пирита при сильном ударе давать искры. Синонимы – серный колчедан, железный колчедан.

**Формула** –  $\text{FeS}_2$ .

**Сингония** – кубическая. Кристаллизуется в виде кристаллов кубической (рис. 67, а), пентагондодекаэдрической (III, рис. 2), реже октаэдрической форм или их комбинаций (рис. 67, б), на гранях характерна взаимно перпендикулярная штриховка. Двойники по закону железного креста – двойники взаимопроникающие (III, рис. 2).

Чаще встречается в виде вкраплений неправильных зерен в горных породах, в плотных, сплошных зернистых (III, рис. 3), иногда рыхлых массах черного цвета, а также почковидных, шаровидных агрегатов. Образуются по пириту псевдоморфозы лимонита с сохранением внешней кубической формы пирита (III, рис. 1).

**Цвет** – латунно-желтый, золотистый с пестрой или бурой побежалостью.

**Цвет черты** – буровато-черный или зеленовато-черный, с пестроокрашенной побежалостью.

**Блеск** – сильный металлический, особенно на гранях кристаллов.

**Прозрачность** – непрозрачный минерал.

**Твердость** – 6–6,5. От всех похожих на него минералов отличается высокой твердостью и чертит стекло.

**Плотность** – 4,9–5,01.

**Хрупкость** – хрупок, особенно если обогащен включениями золота.

**Излом** – неровный, иногда раковистый, в сплошных массах – зернистый.

**Спайность** – обычно нет, но иногда проявляется до совершенной.

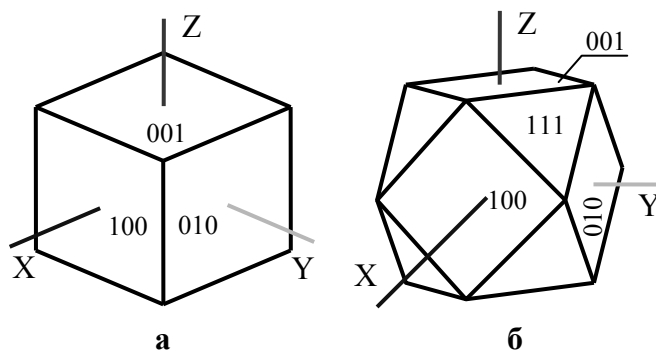


Рис. 67. Кристаллы пирита:

а – куб; б – комбинация куба с октаэдром

### **Диагностические признаки**

Пирит легко узнается по кубическим кристаллам со взаимно перпендикулярной штриховкой. Отличается от других желтоватых минералов с металлическим блеском более высокой твердостью, плотностью и побежалостью. Температура плавления 1150 °С. В зоне окисления неустойчив. При выветривании, разлагаясь, образует лимонит и серную кислоту, он самый активный агент химического выветривания.

*Химические свойства* – в разбавленной соляной кислотой HCl не растворяется, с трудом растворяется в азотной кислоте HNO<sub>3</sub>, но в порошке в концентрированной азотной кислоте растворяется полностью и легко.

**Происхождение** – магматическое (в диоритах, гранитах), пегматитовое (в различных по составу жилах), контактово-метасоматическое (мраморах, серпентинитах), встречается и в осадочных образованиях (известняках, мергелях и др.). Пирит является наиболее распространенным минералом среди сульфидов. В некоторых сульфидных рудах может быть главным минералом. В качестве включений в пирите может содержаться золото. При окислении пирит может переходить в сульфиды железа, которые затем образуют лимонит.

**Месторождения** – на Среднем Урале, Алтае, Закавказье, Оренбургской и Новгородской областях, Подмосковье и т.д.

**Применение** – пирит – основное сырье для получения серной кислоты, которая широко используется в химической промышленности, огарки используются в качестве железной руды или для производства красителей. Кроме того, из пирита попутно извлекаются примеси: золото, медь, селен, серебро, кобальт, цинк, никель и другие элементы. Пирит используется для очистки газовых отходов химических предприятий от хлора. Обладает способностью осаждать золото из растворов, на этом основано использование его для добычи золота, содержащегося в морской воде. Пирит в количестве 1–2% в строительных материалах (облицовочных плитах, щебне, заполнителе бетона и т.д.) является вредной примесью. Пирит добывается в качестве источника серы.

## ХАЛЬКОПИРИТ

**Название** – от греч. «χαλκος» – «медь» и «πύρ» – «огонь». Синонимы – медный колчедан, медный пирит.

**Формула** – CuFeS<sub>2</sub>.

*Сингония* – тетрагональная. Форма редких кристаллов ближе к тетраэдру (Ш, рис. 4), слегка удлиненному или октаэдру (рис. 68). Двойники взаимопрорастающие или

пластинчатые. Обычно встречается в сплошных зернистых массах (III, рис. 5) или в виде вкрапленности отдельных зерен в рудных жилах и почти во всех типах горных пород.

*Цвет* – латунно-желтый, золотисто-желтый, на воздухе часто с синей или пестрой побежалостью наподобие павлиньих перьев (III, рис. 4). Иногда покрывается фиолетовой до черной пленкой.

*Цвет черты* – зеленовато-черный.

*Блеск* – сильный металлический.

*Прозрачность* – непрозрачный.

*Твердость* – 3,5–4.

*Плотность* – 4,1–4,2.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный.

*Спайность* – ясная.

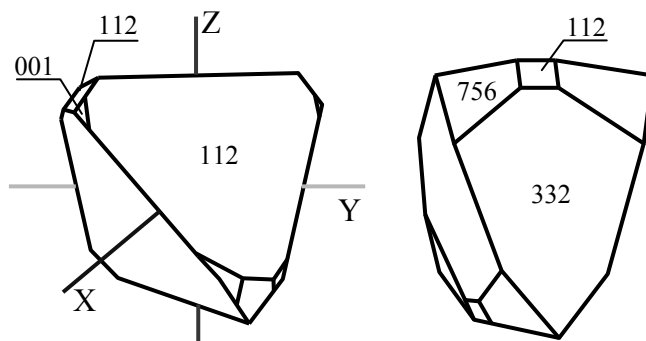


Рис. 68. Тетраэдрические кристаллы халькопирита

### **Диагностические признаки**

Халькопирит отличается тетраэдрическими кристаллами (рис. 68). От пирита халькопирит легко отличается меньшей твердостью, от золота – хрупкостью, цветом и отсутствием магнитности – от других минералов.

*Химические свойства* – в азотной кислоте  $\text{HNO}_3$  постепенно разлагается с выделением хлопьев серы и окрашиванием раствора в зеленоватый цвет. Соляная кислота  $\text{HCl}$  халькопирит не растворяет. Плавится при температуре  $1000^\circ\text{C}$ .

*Происхождение* – чаще всего гидротермальное, иногда контактово-метасоматическое (скарны), также магматическое (кварцевых диоритах) и экзогенное (осадочное), осаждаясь из пересыщенных медным купоросом растворов поверхностных вод (медистые песчаники Джезказгана в Казахстане).

*Месторождения* – на Урале, в Читинской области, Норильске, Рудном Алтае, Казахстане.

*Применение* – халькопирит является одним из главных источников получения чистой меди. Промышленное содержание меди в таких рудах обычно колеблется в пределах 2–2,5%. Медь используют как в чистом виде, так и в виде сплавов (латуни, бронзы и др.). Мировая добыча меди на 1978 год составляла примерно 2 миллиона тонн в год. После пирита халькопирит является одним из самых распространенных сульфидов и самым распространенным минералом меди, но промышленное значение халькопирит приобретает только при больших масштабах. Спрос на медь очень велик, и нет отрасли, где бы она не использовалась. Ограниченность ресурсов в свою очередь заставляет искать замену этому металлу.



## ГАЛЕНИТ

**Название** – от лат. «galena» – «свинцовая руда». Синоним – свинцовый блеск.

**Формула** – PbS.

**Сингония** – кубическая (рис. 69, а). Кристаллические формы – гексаэдры, реже октаэдры, кубоктаэдры (рис. 69, б, в), встречаются только в друзовых пустотах. Двойники взаимопрорастающие и контактные (пластинчатые – IV, рис. 1).

Сплошные крупно и очень мелкозернистые массы галенита, называются «свинчаком» (IV, рис. 3). Встречается во всех типах горных пород в качестве вкрапленности (IV, рис. 2).

**Цвет** – свинцово-серый.

**Цвет черты** – свинцово-серый, темно-серый до черной.

**Блеск** – на плоскостях спайности сильный металлический.

**Прозрачность** – непрозрачный минерал.

**Твердость** – 2–3.

**Плотность** – 7,4–7,58.

**Хрупкость** – очень хрупок.

**Излом** – плоскораковистый или мелкоступенчатый.

**Спайность** – весьма совершенная по кубу, в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Легко раскалывается по спайности.

### **Диагностические признаки**

Легко отличается по совершенной спайности, сильному металлическому блеску, цвету, низкой твердости и очень высокой плотности. При нагревании галенит выделяет сернистый дым и образует шарики металлического свинца. Температура плавления галенита 1112 °С.

**Химические свойства** – растворяется в азотной кислоте  $\text{HNO}_3$  с выделением окисного сернокислого свинца  $\text{PbSO}_4$  и хлопьев серы. При выветривании разлагается.

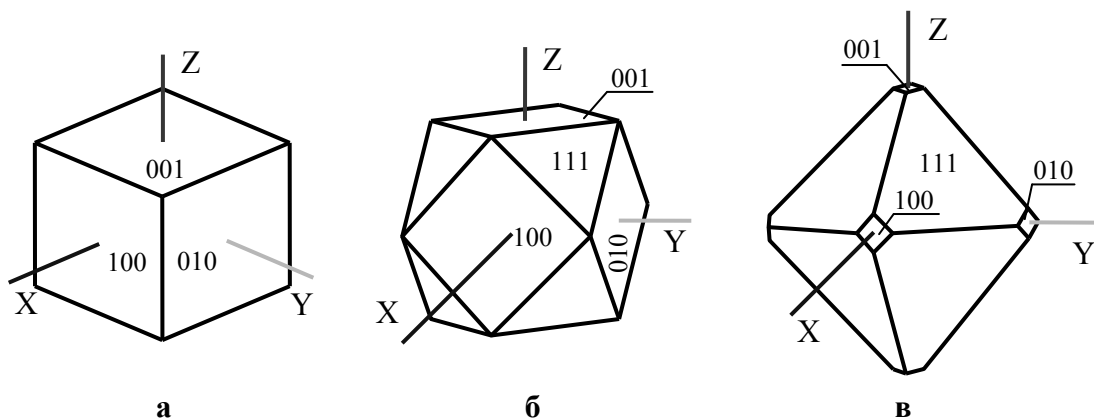


Рис. 69. Кристаллы галенита:

а – куб; б – кубоктаэдр (комбинация); в – комбинация октаэдра с кубом

**Происхождение** – наряду с пиритом, халькопиритом галенит один из самых распространенных сульфидных минералов, образующихся главным образом в гидротермальных низкотемпературных жилах, а также скарновое и в осадочных горных породах (известняках).

**Месторождения** – на Урале, в Восточном Забайкалье, на Рудном Алтае, в Приморском крае и др. местах.

**Применение** – галенит – это минерал свинца и поэтому является главной рудой для его получения. Свинец применяется в производстве аккумуляторных пластин, сплавов (баббит, типографский сплав, свинцовая бронза), в смеси с мышьяком для изготовления дроби (шрапнель). В кабельной и химической промышленности, в кислотном производстве (свинцовые трубы и листы), в рентгенотехнике (изолятор для рентгеновских лучей). Это свойство задерживать радиоактивные излучения широко используется в атомной промышленности и при изготовлении оборудования для космических исследований. Соединения свинца используются в производстве красок (свинцовые белила, желтая, сурик, крон), для приготовления сиккативов, растворяя которые в льняном масле получают олифы и при изготовлении хрустального стекла, применяется в качестве антидетонационных добавок в бензин для сокращения вреда окружающей среде. Кроме того, при плавке из галенита извлекается значительная доля мировой добычи серебра, селена, висмута, мышьяка, сурьмы, меди, цинка и других металлов.

## КИНОВАРЬ

**Название** – от араб. «кинобари» – «кровь дракона», возможно индийского происхождения. Отражает сходство с красной смолой драконового дерева, считавшейся «драконовой кровью». Синоним – ртутная обманка. Это важнейший минерал ртути, так как ее содержание 86,2%, серы – всего 13,8%. Редко встречается в виде самородной ртути.

**Формула** – HgS.

**Сингония** – тригональная. Кристаллы редки: толстотаблитчатые или кубообразные, ромбоэдрические, коротко призматические (рис. 70). Типичны двойники прорастания. Встречается чаще всего в виде плотных зернистых агрегатов (IV, рис. 5) или землистых скоплений, крупных и мелких вкраплений (IV, рис. 6) в песчаниках и углистых сланцах, примазок по трещинам.

**Цвет** – от ярко-малиново-красного до коричневатого-красного.

**Цвет черты** – ярко-красный.

**Блеск** – алмазный, до почти металлического в случае темной окраски, у рыхлых разностей – матовый.

*Прозрачность* – полупрозрачная.

*Твердость* – 2–2,5.

*Плотность* – 8,0–8,09.

*Хрупкость* – хрупкая.

*Излом* – раковистый, неровный.

*Спайность* – совершенная в одном направлении.

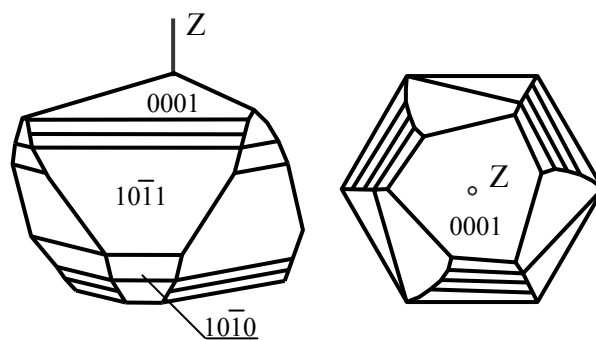


Рис. 70. Кристаллы киновари

### **Диагностические признаки**

Этот минерал легко распознается по яркому цвету и красной черте, алмазному блеску, низкой твердости и очень высокой плотности.

*Химические свойства* – растворяется с трудом в царской водке, а кислоты  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  не действуют, в них минерал нерастворим даже при нагревании. Температура плавления  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ . При нагревании улетучивается (дым ядовит!). На поверхности земли устойчива и может скапливаться в россыпях.

*Происхождение* – типичное гидротермальное или из горячих источников, оба низкотемпературные, связанные с областями современной или молодой вулканической активности, присутствует в песчаниках или кварцитах. При окислении переходит в самородную ртуть, окись ртути.

*Местонахождение* – Средняя Азия, Алтай, Никитовское (Украина) и др. Крупнейшее месторождение ртути в Испании (Альмаден) эксплуатируется со времен Древнего Рима и его запасов хватит еще на 100 лет, чтобы удовлетворить мировую потребность.

*Применение* – киноварь почти единственный основной источник промышленного получения ртути Hg (86%) и ее соединений. Ртуть используют в химической и электротехнической промышленности. Применяется для изготовления красок, ртутных ламп, ртутных термометров (градусников) и многих медицинских препаратов. Используется в военной промышленности. Ведутся работы по выращиванию ее монокристаллов.

## **III. КИСЛОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

### **КЛАСС ОКИСЛЫ (ОКСИДЫ)**

Оксиды – это соединения химических элементов с кислородом, а гидроксиды – с гидроксидом. Обычно в этот класс включают не только окислы (оксиды), но и гидроокислы (гидроксиды). Мы разделили их на два класса.

Опишем некоторые минеральные виды из этих классов. Среди оксидов одни авторы выделяют более 300, а другие только 150 минеральных видов. Все вместе они составляют до 17% всей массы земной коры. В классе оксиды охарактеризуем только отдельные минералы:

1. Кварц  $\text{SiO}_2$  и халцедон (скрытокристаллический).
2. Корунд  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
3. Гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
4. Магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

## КВАРЦ

**Название** – от нем. «Quarz» – «кварц», которое по одной из версий восходит через «Querertz» к старонемецкому (саксонскому) «Querklufertz», что означает «поперечные жилы».

**Формула** –  $\text{SiO}_2$ .

**Сингония.** У кварца существует две модификации, относящиеся к двум сингониям: первая – гексаганальная (высокотемпературный  $\alpha$ -кварц) образуется при температурах свыше  $573^\circ\text{C}$  и устойчив в пределах  $870\text{--}575^\circ\text{C}$  (рис. 71, а). Вторая – тригональная. Все ее разновидности возникли при температуре менее  $573^\circ\text{C}$  (низкотемпературный  $\beta$ -кварц). Эта модификация широко распространена, и ее называют кварцем (рис. 71, б).

Характерный габитус правильных кристаллов – сочетание пирамиды с толщиной призмы или шестигранной дипирамиды (V, рис. 2, 3). Вообще кварц богат формами. Кварц в оксиды отнесен условно, он относится к каркасным силикатам. Характерны для него три типа двойников, но они редко проявляются в облике кристаллов, особенно последний, называемый японским. Встречается кварц в виде друз, в жилах, жеодах (V, рис. 4, 5, 6; VI, рис. 2).

Обычные же зернистые массы иногда бывают плотными скрытокристаллическими. Кварц один из наиболее чистых минералов (V, рис. 1, 4; VI, рис. 2, 3).

**Цвет** – может быть самым различным от белого до черного и обусловлен главным образом примесями. У кварца выделяют следующие разновидности: аметист – фиолетовый (VI, рис. 2, 4); раухтопаз – дымчатый кварц (V, рис. 6); горный хрусталь – бесцветный кварц (V, рис. 2, 4); морион – кристаллы кварца, окрашенные в черный цвет (V, рис. 3, 5); цитрин – золотистый и многие другие.

**Цвет черты** – не дает черту, царапает плитку.

**Блеск** – стеклянный на гранях кристаллов, жирный – на изломе. На гранях кристаллов помимо блеска характерна поперечная штриховка.

*Прозрачность* – может быть прозрачным, полупрозрачным.

*Твердость* – 7, эталонный минерал шкалы Мооса.

*Плотность* – 2,65.

*Хрупкость* – минерал хрупкий.

*Излом* – раковистый.

*Спайность* – отсутствует.

### **Диагностические признаки**

*Особые свойства* – разновидность кварца – горный хрусталь обладает пьезоэлектрическими свойствами: под влиянием механических напряжений в нем возникают электрические заряды.

Пропускает ультрафиолетовые лучи.

Обычный кварц плавится при  $t = 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кварц легко узнается по форме кристаллов, высокой твердости, отсутствию спайности.

*Химические свойства* – растворяется только в плавиковой кислоте (фтористоводородной HF) и горячей фосфорной  $\text{H}_2\text{PO}_4$ .

При выветривании весьма устойчив.

**Происхождение** – магматическое (граниты), метаморфическое (гнейсы, сланцы и т.д.), пегматитовое (пегматиты), гидротермальное (кварцосодержащие жилы), пневматолитовое и осадочное (различной крупности пески, песчаники). Кварц – один из самых распространенных минералов в земной коре.

**Месторождения** – в виде разнозернистого кварца, иногда горного хрусталя – на Урале, в Якутии, Забайкалье, Памире, стекольные пески Андреевского озера (г. Тюмень), нет ни одного района, чтобы не встретился кварц.

**Применение** – кристаллы кварца, обладающие уникальными физическими свойствами, применяются в электро- и ультразвуковой технике, оптическом приборостроении и других отраслях. В больших количествах кварц потребляется стекольной и керамической промышленностью (горный хрусталь и маложелезистый кварцевый песок), производством огнеупоров (динас). Искрометные, чистой воды кристаллы горного хрусталя применяются в производстве стекол оптических инструментов, ювелирных, художественных изделий, химической посуды. Горный хрусталь, раухтопаз (дымчатый кварц), морион (черный кварц) используются в радиотехнике как стабилизаторы радиоволн – позволяют пере-

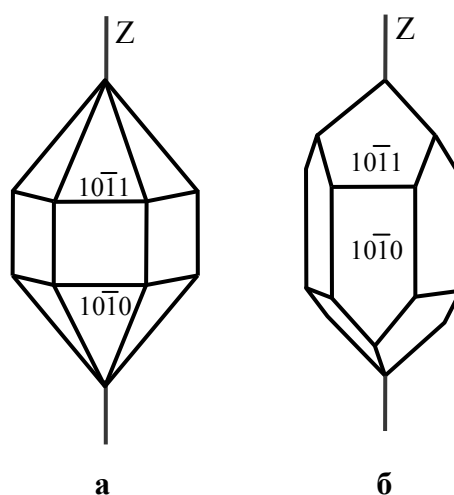


Рис. 71. Обычные кристаллы кварца: а – бипирамидальный – высокотемпературный (комбинация гексагональной дипирамиды и короткой гексагональной призмы); б – призматический – низкотемпературный

давать и принимать радиоволны строго определенной длины. Горный хрусталь применяется в автоматике и телемеханике, в высококачественных генераторах. Окрашенные разновидности кварца (аметист, цитрин, авантюрин, тигровый глаз, кошачий глаз и др.) употребляются как полудрагоценные и поделочные камни. Желтый и прозрачный цитрин после огранки продается как топаз. Аметист при нагревании становится желтым и большая часть «цитрина» на самом деле представляет собой аметист, подвергшийся тепловой обработке. Возможно, от радиоактивности в бесцветном кварце появляется дымчатость и от примесей.

## ХАЛЦЕДОН

**Название** – связывают с названием города Халцедон (Битинья) на побережье Мраморного моря, через который вывозились ювелирные камни.

**Формула** –  $\text{SiO}_2$ .

***Сингония*** – минерал представляет собой скрытокристаллическую форму кварца (VII, 1, 2). Образует округлые миндалины и жеоды в вулканических породах, натечные, плотные агрегаты, псевдоморфозы по дереву и т.д. Халцедон, как и кварц, является главным породообразующим минералом кремния, яшмы и кремнистых сланцев.

***Цвет*** – самый разнообразный: красные разновидности разных оттенков называют сердоликом; зеленоватые – плазмой; желтые – восковым халцедоном; белые фарфоровидные – кахолонгом. Концентрически зональные полосато окрашенные разновидности – это агаты и ониксы (VII, рис. 4, 5, 6). Окраска зависит от примесей. Непрозрачные стяжения желтовато-серого, бурого и темно-серого халцедона называют кремнями (VII, рис. 3).

***Цвет черты*** – не дает черту.

***Блеск*** – матовый или восковой.

***Прозрачность*** – может быть полупрозрачным, т.к. просвечивает в тонких сколах.

***Твердость*** – 6,5–7, иногда 8.

***Плотность*** – 2,55–2,65.

***Хрупкость*** – минерал хрупкий.

***Излом*** – раковистый.

***Спайность*** – отсутствует.

### **Диагностические признаки**

***Химические свойства*** – высококислотоустойчивый минерал, растворяется в фтористоводородной кислоте HF, горячей фосфорной  $\text{H}_2\text{PO}_4$ .

**Происхождение** – эндогенное (магматическое, метаморфическое) – в гранитах и гнейсах, и экзогенное (окаменелое дерево) – в процессе выветривания. Минерал весьма широко распространен.

**Месторождения** – Урал, Белоруссия, Камчатка, Восточная Сибирь, Забайкалье, Дальний Восток, Кировская область и многие др. места.

**Применение** – употребляется для изготовления украшений и предметов искусства, в точном приборостроении, для часовых камней, опорных призм, ступок, точных химических весов, деталей электрических счетчиков, как цапфы теодолитов и нивелиров, шарики для подшипников и как абразивный материал, для обработки твердых металлов, при буровых работах. Халцедон в водных бассейнах используется некоторыми организмами (радиоляриями и др.) для постройки своих скелетов.

## КОРУНД

**Название** – предположительно от индийского слова «каурунтака», восходящего к санскритскому «курувинда» (значение не известно).

**Формула** –  $Al_2O_3$ .

**Сингония** – тригональная. Кристаллы имеют форму бочонковидную (рис. 72, а), дипирамидальную (рис. 72, б), реже столбчатую, пластинчатую, короткопризматическую, реже ромбоэдрическую. Бочонковидную форму кристаллы корунда принимают из-за развития граней дипирамид. Грани призм и пирамид имеют горизонтальную штриховку, из-за комбинации чередующихся граней с различным наклоном. Но чаще всего встречается в виде вкраплений неправильной формы в горных породах, округлых зерен и в россыпях, обычны пластинчатые двойники. Кристаллы выращивают искусственно.

**Цвет** – голубой, красный, зеленый, желтый и др. Красная его разновидность – рубин (VIII, рис. 3), синяя – сапфир (VIII, рис. 1, 2), бесцветная – лейкосапфир (бесцветный сапфир), чёрная – наждак. Чистый корунд – белый.

**Цвет черты** – черту не дает, но царапает плитку.

**Блеск** – алмазный до стеклянного.

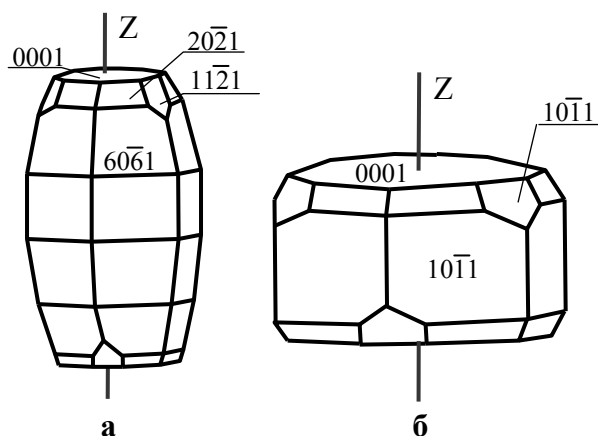


Рис. 72. Кристаллы корунда:  
а – бочонковидный дипирамидальный;  
б – короткопризматический

*Прозрачность* – в кристаллах прозрачен, полупрозрачен, в темных массах непрозрачен.

*Твердость* – 9, эталонный минерал шкалы Мооса.

*Плотность* – 4–4,1; 3,98 – чистый.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный.

*Спайность* – отсутствует.

### **Диагностические признаки**

Отличается очень высокой твердостью, формой кристаллов (бочонковидная форма), нерастворимостью в воде. Температура плавления 2021 °С. В условиях выветривания устойчив.

*Химические свойства* – в кислотах не растворяется.

**Происхождение** – метаморфическое, магматическое, пегматитовое (при метаморфизме бокситов, а также в гнейсах, вторичных кварцитах, кристаллических сланцах), осадочное (в россыпях) и др.

**Месторождения** – крупнейшие залежи встречаются на Урале, в Якутии и др. местах.

**Применение** – высокая твердость корунда определяет его практическое значение: порошок корунда применяется для шлифовки драгоценных камней, металлов, оптических стекол. Из сцементированных молотых корундовых пород изготавливают круги шлифовальных станков. Кроме того, в наклеенном виде на бумагу или полотно он дает наждачные шкурки. Благородные разновидности – рубин и сапфир – драгоценные камни. Они могут играть роль подшипников и опорных камней в часовых механизмах, обеспечивая высокую точность хода и продлевая их жизнь. Используются в электрических генераторах (лазерах), датчиках перепада давления в магистральных трубопроводах. Из искусственного бесцветного сапфира делают иллюминаторы в аппаратах высокого давления и температур, в вакуумных камерах. Перья самописцев в метеорологических приборах, изготовленные из рубина, в 300 раз долговечнее стальных.

## ГЕМАТИТ

**Название** – от греч. «αἷμα» – «кровь», в родительном падеже «αἱματικὴς» – «кровоавый», по кроваво-красной окраске черты. Синоним – красный железняк. В качестве разновидностей гематита выделяют: железный блеск – тонкочешуйчатые образования черного цвета – «железная слюдка»; красный железняк (гематит кровавик) – плотные агрегаты красного цвета; железный оолит – округлые скорлуповатые разности красного железняка.

**Формула** – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



*Сингония* – тригональная. Гематит часто встречается в пластинчатых кристаллах (рис. 73, а, VIII, рис. 4, 5), которые иногда срastaются в виде «железных роз», ромбоэдрических (рис. 73, б), таблитчатых кристаллах. Двойники взаимопроникающие и чаще пластинчатые. Обычно образуется в виде землистых, зернистых почковидных, сталактитовых, оолитовых агрегатов или плотных масс.

*Цвет* – красный, бурый, от железно-черного до серо-стального, иногда с радужной побежалостью.

*Цвет черты* – вишнево-красный, иногда красно-коричневый.

*Блеск* – сильный металлический (у кристаллов) и полуметаллический до матового (в плотных массах).

*Прозрачность* – просвечивает только в тончайших пластинках густо красным цветом, в других формах – непрозрачный.

*Твердость* – 5–6, более высокое значение (6) относится к хорошо оформленным кристаллам, у землистых разновидностей она ниже.

*Плотность* – 5–5,2 – минерал тяжелый.

*Хрупкость, ковкость* – минерал хрупкий, поэтому нековкий.

*Излом* – неровный, землистый.

*Спайность* – отсутствует.

#### **Диагностические признаки**

Узнается по характерной вишнево-красной черте, твердости, плотности. Химически стойкий при выветривании. Как аксессуарный минерал соляных залежей, придает, например, галиту и др. минералам красный цвет. Температура плавления 1594 °С.

*Химические свойства* – медленно растворяется в 10% соляной кислоте HCl, лучше в концентрированной.

**Происхождение** – метаморфическое, контактово-метасоматическое, магматическое, пегматитовое, образуется иногда в высокотемпературных гидротермальных жилах, осадочное (крупнейшие месторождения).

**Месторождения** – Северный и Средний Урал в пределах России и др. местах.

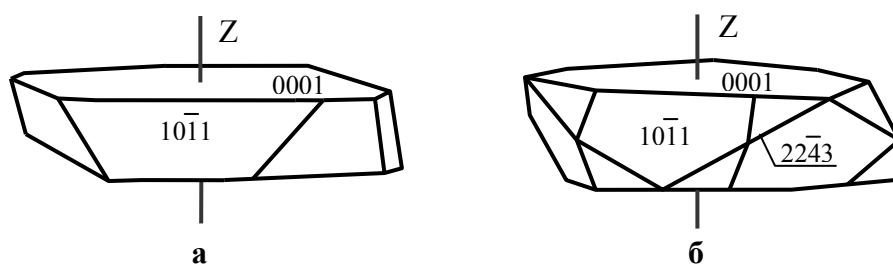


Рис. 73. Кристаллы гематита: а – пластинчатый, б – ромбоэдрический

**Применение** – это важнейшая железная руда, из которой выплавляют чугун и сталь, необходимые практически во всех областях народного хозяйства – в строительстве, на транспорте и тяжелой индустрии и т.д. Содержание железа в рудах колеблется от 50 до 65%, они беднее магнетитовых, но встречаются гораздо чаще. Мировые запасы этой руды исчисляются миллиардами тонн. Порошковые разновидности гематита используются для получения красной краски (мумия, железный сурик) и для изготовления красных карандашей. Кристаллы и плотные массы используются как поделочный камень (в частности плотный гематит под названием кровавик).

## МАГНЕТИТ

**Название** – предполагают, дано или по местности Магнезия в Македонии, или по имени пастуха Мантуса (Магнеса), впервые нашедшего магнитный минерал. Он заметил, что железный наконечник его посоха и гвозди подошвы ботинок прилипают к земле по ходу движения. Синоним – магнитный железняк. Разновидность титаномагнетит, содержит окись титана.

**Формула** –  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  или  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

**Сингония** – кубическая. Облик кристаллов почти всегда октаэдрический (IX, рис. 1), иногда ромбододекаэдрический (рис. 74). Большею частью встречается в сплошных зернистых массах (IX, рис. 2) и в виде вкраплений в горных породах (основных и ультраосновных).

**Цвет** – железно-черный, иногда с синеватой побежалостью на кристаллах.

**Цвет черты** – черный.

**Блеск** – металлический, иногда полуметаллический.

**Прозрачность** – непрозрачен.

**Твердость** – 5,5–6, более высокое значение (6) относится к хорошо оформленным кристаллам.

**Плотность** – 4,9–5,2.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – зернистый в сплошных массах, раковистый и неровный – в кристаллах.

**Спайность** – отсутствует.

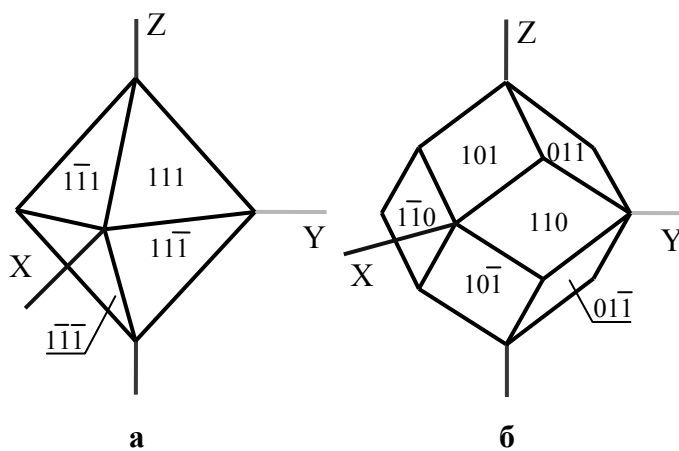


Рис. 74. Кристаллы магнетита:  
а – октаэдр, б – ромбододекаэдр

### **Диагностические признаки**

*Особые свойства* – сильно магнитен, как до прокаливания, так и после прокаливания. Характерен черный цвет, синяя побежалость, черная черта, высокая твердость и плотность, формы кристаллов. Температура плавления 1591 °С.

*Химические свойства* – растворяется в концентрированной соляной кислоте. В порошке растворяется в разбавленной соляной кислоте HCl. Минерал химически устойчив при процессах выветривания.

**Происхождение** – главным образом магматическое (в ультраосновных породах, как бы цементирует зерна оливина и пироксена), габбро-громadne обособления титаномагнетита, контактово-метасоматическое, как аксессуарный минерал в гранитах, сиенитах, метаморфическое (в правильных кристаллах в сланцах), железистых кварцитах при региональном метаморфизме, гидротермальное – в жилах, осадочное, при поверхностном выветривании, во многих метеоритах.

**Месторождения** – в России крупнейшие залежи находятся на Урале, Кольском полуострове, в Восточной Сибири и др. местах. Россия по запасам железных руд занимает ведущее место в мире.

**Применение** – наряду с гематитом и лимонитом магнетит важная руда для выплавки чугуна и стали (в ней 72% Fe). Попутно извлекают также Ti, V, Ni, Mn, Cr и другие элементы. Если в магнетите содержится несколько процентов титана, он называется титаномагнетитом. Чистое нержавеющее железо применяют в химических лабораториях, в специальных точных приборах. Из магнетита изготавливают магниты для вычислительных машин и в ускорителях элементарных частиц, магниты создают условия протекания термоядерной реакции, так как магнитная камера способна удерживать плазму с температурой в сотни миллионов градусов.

## КЛАСС ГИДРООКИСЛЫ (ГИДРОКСИДЫ)

Из гидроксидов рассмотрим только следующие минералы:

1. Опал  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .
2. Лимонит  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

### ОПАЛ

**Название** – опал (твердый гидрогель кремнезема) происходит от лат. «opalus», что означает драгоценный, или благородный, камень. Со временем опал теряет воду и переходит в халцедон.

**Формула** –  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

*Сингония* – опал аморфный минерал, поэтому правильных кристаллических форм не образует (IX, рис. 3). Это обычно плотные стеклоподобные массы в виде почковидных агрегатов, корочек, желваков и оолитов. Входит в состав трепела, опоки, диатомита и других горных пород.

*Цвет* – сам опал бесцветен (белый), за счет примесей окрашивается в желтый, бурый, красный, зеленый, оранжевый и черный цвета. По цвету выделяют много разновидностей опала: благородный опал – просвечивающий, голубовато-белый – используется как драгоценный камень; опал огненный – красный; стеклянный опал – прозрачный, напоминающий замерзшие капли воды, опал обыкновенный – непросвечивающий или просвечивающий в тонких краях и мн. другие.

*Цвет черты* – окрашенной черты не образует.

*Блеск* – восковой или перламутровый.

*Прозрачность* – непрозрачен, иногда полупрозрачен.

Непрозрачным опал бывает тогда, когда содержит примеси Mg, Fe, Cu.

*Твердость* – 5,5–6,5.

*Плотность* – 2,0–2,3 г/см<sup>3</sup>.

*Хрупкость* – минерал хрупкий.

*Излом* – раковистый.

*Спайность* – отсутствует.

### **Диагностические признаки**

Похож на халцедон, в который он обычно переходит при кристаллизации. Отличается от халцедона низкой плотностью. В природе устойчив.

*Химические свойства* – растворяется в едких щелочах (плавиковой кислоте). Содержание воды колеблется от 3 до 10%.

**Происхождение** – экзогенно-осадочное, гидротермальное (выполняющий пустоты и трещины в породах) или органическое (огромные массы опалов выделяют микроскопические диатомовые водоросли, живущие в морях).

**Месторождения** – на Урале, Алтае, в Забайкалье, на Чукотке, в Ульяновской, Саратовской областях, в Донецкой впадине и др. местах.

**Применение** – богатые опалом осадочные породы (диатомит, трепел, опока) используются для получения цемента (в качестве гидравлических добавок), изготовления легкого кирпича и др. звуко- и теплоизоляционных материалов и наполнителей фильтров. Тонкозернистые опаловые образования служат в качестве шлифовальных и полировочных порошков. Благородный и огненный опал используется как драгоценный камень.

## ЛИМОНИТ

**Название** – лимонит, или бурый железняк происходит от древнегреческого «λεῖμων» – «луг», по месту нахождения его в сырых местах, болотах – болотная руда. Лимонит – собирательное название для природных минеральных агрегатов (смесей гидроокисей трехвалентного железа).

**Формула** –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

***Сингония*** – лимонит аморфное вещество, кристаллов не образует, представляет собой смесь коллоидных частиц окислов железа и адсорбированной воды, поэтому он не обладает постоянным химическим составом. Характерны для него натечные (IX, рис. 4), почковидные, шарообразные формы или землистые массы (IX, рис. 5). Бурый железняк широко распространен на поверхности Земли среди осадочных пород в качестве включений и самостоятельных образований промышленного значения.

***Цвет*** – охристо-желтый, коричневый, ржаво-бурый до черного. Порошковатый или охристый лимонит, нередко образующийся при физическом выветривании плотного лимонита и силикатов железа, обладает светлым, желто-бурым цветом.

***Цвет черты*** – светло-бурый или желто-бурый до красноватого.

***Блеск*** – матовый, полуметаллический.

***Прозрачность*** – непрозрачный минерал, но в очень тонких сколах просвечивает красным, коричневым, бурым цветом.

***Твердость*** – 1–2 у землистых разновидностей, до 5 у плотных натечных образований.

***Плотность*** – 3,3 у рыхлых разновидностей, до 4,0 у плотных разновидностей.

***Хрупкость, ковкость*** – хрупкий.

***Излом*** – раковистый до неровного и землистого.

***Спайность*** – отсутствует.

### **Диагностические признаки**

Для лимонита характерна низкая твердость у землистых и высокая у натечных разновидностей.

***Химические свойства*** – медленно растворяется в соляной кислоте HCl. В природе слабоустойчив: теряя воду под действием повышенной температуры, может перейти в гематит или магнетит. Температура плавления 1400 °С.

**Происхождение** – экзогенное при окислении и разложении (выветривании) железосодержащих минералов (сульфидов, карбонатов, силикатов и др., в которых железо присутствует в двухвалентной форме), осадочное (в болотах и почвах, морях и озерах при химическом выветривании), магматическое (в ультраосновных породах).

**Месторождения** – в Крыму, на Северном Кавказе, Южном Урале, в Казахстане.

**Применение** – сырье для выплавки железа. Порошковатый (землистый) лимонит используется как краска (железная охра, умбра).

## КЛАСС СИЛИКАТЫ

В классе силикатов примерно треть всех минералов, и, хотя многие из них являются редкими, они слагают большую часть земной коры, состоящей почти на 95% из силикатных минералов, из которых 60% составляют полевые шпаты и 12% кварц. Из-за сложного внутреннего строения они подразделяются на подклассы: каркасные, цепочечные, листовые, островные и ленточные силикаты, каждый из которых имеет свои группы.

По весу этот класс составляет около 90% объема земной коры. Эти минералы являются породообразующими для магматических и метаморфических горных пород.

### Подкласс КАРКАСНЫЕ СИЛИКАТЫ

В этом подклассе в начале должен быть описан кварц, а он традиционно описывается в классе «Окислы». Характеристику этим силикатам произведем с полевых шпатов.

Название от нем. «shalten» – «раскалываться по трещинам», способность раскалываться на пластины по спайности, полевой – в связи с частыми находками в поле. Они подразделяются на подгруппы:

1. Калиевые полевые шпаты – моноклинные кристаллы минералов: ортоклаз и микроклин.
2. Известково-натровые полевые шпаты (плаггиоклазы) – строго триклинные: альбит, андезин, лабрадор, анортит.
3. Фельдшпатыды – нефелин.

Фельдшпатыды выделены по химическому, а не по структурному принципу, как это произведено у всех других минералов этого подкласса.

Из *подгруппы «калиевые полевые шпаты»* опишем ортоклаз и микроклин.

### ОРТОКЛАЗ

**Название** – от греч. «ὀρθος» – «прямой» и «κλασις» – «ломание», т.е. прямо-раскалывающийся – плоскости спайности пересекаются под прямым углом, этим

свойством он резко отличается от микроклина, по химическому составу не отличается. Низкотемпературный ортоклаз иногда опалесцирует и называется лунным камнем. Используется как полудрагоценный минерал.

**Формула** –  $K[AlSi_3O_8]$  или  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ .

**Сингония** – моноклинная. Кристаллы коротко призматического (X, рис. 1) и таблитчатого (IX, рис. 2, 3) габитусов, наиболее четкие кристаллы отображены на рис. 75. По боковой грани возникают простые двойники срастания (X, рис. 1). Но встречается чаще он в агрегатах, сложенных от мелких до крупных зерен и отдельных зерен в различных горных породах.

**Цвет** – светло-розовый, буровато-желтый, красновато-белый до красного, зависит от примесей.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный, перламутровый на плоскостях спайности.

**Прозрачность** – непрозрачный даже в тонких пластинках.

**Твердость** – 6.

**Плотность** – 2,56.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – ступенчатый и неровный.

**Спайность** – совершенная в двух направлениях, идущих под углом  $90^\circ$ .

#### **Диагностические признаки**

Определяется по высокой твердости – эталонный минерал шкалы Мооса, спайность под углом  $90^\circ$  (прямораскалывающийся).

**Химические свойства** – в воде не растворяется, растворяется только в азотной кислоте  $HNO_3$ . Образует простые кристаллы, но разнообразные двойники. При выветривании ортоклаз переходит в глинистые минералы (каолинит и др.). В природе считается, что он среднеустойчивый минерал. Температура плавления свыше  $1500^\circ C$ .

**Происхождение** – магматическое (в гранитах), метаморфическое (в гнейсах).

**Месторождения** – Карелия, Забайкалье, Урал-Алабашка (Свердловская область), Восточная Сибирь и др.

**Применение** – в чистом виде является сырьем для стекольной и керамической промышленности (производство фарфора, фаянса, эмалей, глазури и т.д.), для черепицы, красок и др. Составляет важную часть многих горных пород

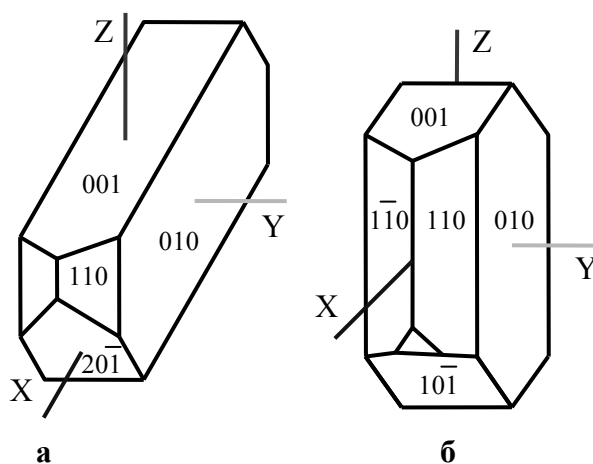


Рис. 75. Кристаллы ортоклаза:  
а – толстотаблитчатый (уплощенный по Y);  
б – призматический (столбчатый).

(гранитов, пегматитов, гнейсов и др.), являющихся естественными строительными материалами. Разновидности ортоклаза – лунный и солнечный камень – облицовочные и поделочные материалы.

## МИКРОКЛИН

**Название** – получил из-за небольшого отклонения от прямого угла (всего  $20^\circ$ ) при расколе (с греч. «μικρος» – «малый» и «κλινω» – «наклонять», т.е. немного наклоненный). Это низкотемпературная разновидность калиевого полевого шпата.

**Формула** –  $K[AlSi_3O_8]$ .

**Сингония** – триклинная. Кристаллы пластинчатого (X, рис 6), коротко призматического облика (X, рис. 5), часто удлинённые (рис. 76). Но обычно встречается в виде неправильных зерен. Чаще, чем ортоклаз, встречается в кристаллах. По внешним признакам не отличим от ортоклаза, если не учитывать форму раскалывания (косораскалывающуюся). Под микроскопом же легко узнаётся по характерному решетчатому строению отдельных зерен (полисинтетические двойники). Для микроклина характерны закономерные срастания с кварцем, напоминающие древнеарабские письма – пегматитовые прорастания (называемые пегматитом).

**Цвет** – мясо-красный, розовый, иногда желтый, серый (зеленая разновидность микроклина – амазонит (X, рис. 4). Зеленый цвет амазонит приобретает из-за повышенного содержания в нем примеси рубидия и, возможно, цезия.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный, на плоскостях спайности перламутровый.

**Прозрачность** – непрозрачный.

**Твердость** – 6.

**Плотность** – около 2,6.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – ступенчатый, по спайности ровный.

**Спайность** – совершенная по двум направлениям.

### **Диагностические признаки**

Спайность под углом  $20^\circ$ , т.е. проходит под небольшим углом, высокая твердость, цвет.

**Химические свойства** – аналогичны ортоклазу. При выветривании переходит в глину (каолинитовую). В природе среднеустойчив. Температура плавления свыше  $1500^\circ\text{C}$ .

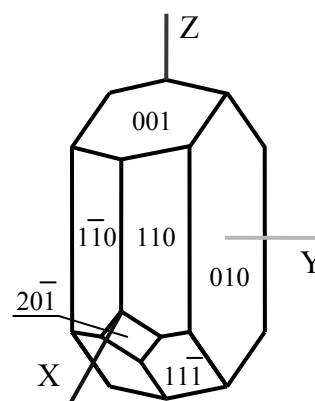


Рис. 76. Кристалл микроклина призматического, удлинённого облика



**Происхождение** – магматическое (в гранитах), но обычно это минерал пегматитов (в пегматитах кристаллы достигают нескольких метров в длину), метаморфическое (в гнейсах) и гидротермальных жилах.

**Месторождение** – в Ильменских горах, на Кольском полуострове, Урале и др.

**Применение** – микроклин – составная часть многих магматических (гранитов, пегматитов), метаморфических (гнейсов) и осадочных (песков) пород, являющихся важными строительными материалами. Используют в керамической промышленности (производство фарфора, фаянса), в стекольной промышленности, в изготовлении эмалей, глазури, мыла и т.д. Зеленая разновидность – амазонит - используется как декоративный поделочный камень.

**Подгруппа «плаггиоклазы» (известково-натровые полевые шпаты)** представляет собой изоморфную непрерывную смесь двух минералов – от чистого альбита  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  (Ab) до чистого анортита  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  (An); в результате образуется целый ряд минералов, которые входят в одну из трех групп (стр. 87, табл. 5). Важное значение среди минералов группы плаггиоклазов имеют следующие: альбит, олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит, анортит.

Плаггиоклазы очень широко распространены в природе и представляют собой породообразующие минералы.

## АЛЬБИТ

**Название** – от лат. «albus» – «белый» по его основной окраске.

**Формула** –  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ .

**Сингония** – триклинная. Хорошо образованные кристаллы, в виде таблитчатого и таблитчато-призматического, столбчатого облика редки (рис. 77), встречаются полисинтетические двойники. Обычно находится в агрегатных скоплениях (XI, рис. 1) и отдельных зернах неправильной формы, от мелких до крупных.

**Цвет** – белый.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный.

**Прозрачность** – непрозрачный в зернах, в кристаллах прозрачный.

**Твердость** – 6–6,5.

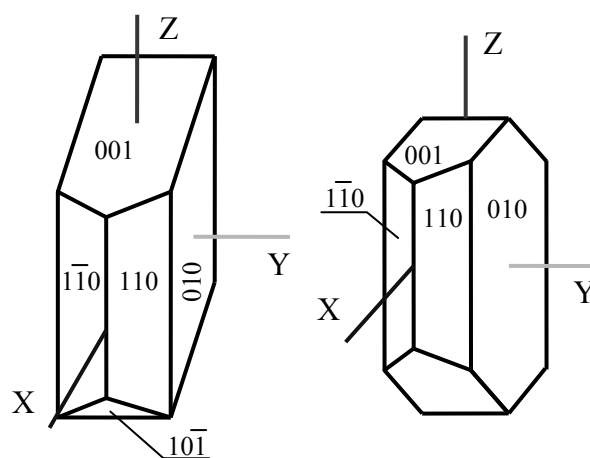


Рис. 77. Кристаллы альбита

*Плотность* – 2,62–2,76.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный, иногда раковистый.

*Спайность* – совершенная в двух направлениях.

### **Диагностические признаки**

Минерал отличается высокой твердостью и низкой плотностью.

*Химические свойства* – не растворяется в воде и слабо растворим в кислотах.

Чистый альбит имеет точку плавления 1100 °С. При выветривании переходит в глинистые минералы с образованием в кислой среде каолинита, а в щелочной – монтмориллонита.

**Происхождение** – магматическое (в гранитах и их аналогах), пегматитовое, осадочное, отчасти метаморфическое (гнейсы, сланцы – низкой ступени метаморфизма), очень чистый альбит встречается в жилах некоторых сланцев.

**Месторождения** – широко распространен альбит в магматических и метаморфических горных породах Урала, Забайкалья, Украины и др. местах.

**Применение** – в стекольной и керамической промышленности, является важнейшей составной частью многих естественных строительных материалов, а также звуко- и теплоизоляционных материалов.

## АНДЕЗИН

**Название** – от названия гор Анды в Ю. Америке, где он впервые был описан.

**Формула** –  $Ab_3An_2$ , альбита содержится 70%, анортита – 30%.

*Сингония* – триклинная. Кристаллы толстотаблитчатого, призматического габитусов, но чаще встречается в виде неправильных зерен.

*Цвет* – бесцветный.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – стеклянный.

*Прозрачность* – непрозрачный.

*Твердость* – 6–6,5.

*Плотность* – 2,67.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный.

*Спайность* – совершенная в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

*Химические свойства* – в кислотах трудно растворим. Температура плавления 1150 °С.

**Происхождение** – магматическое. Встречается в эффузивных (андезитах) и интрузивных (диоритах) магматических горных породах, нередко отмечаются

плагиоклазы и в метаморфических горных породах (в сланцах и гнейсах средней ступени метаморфизма).

**Месторождения** – Урал, Кавказ, Восточная Сибирь и др.

**Применение** – составная часть магматических (диоритов, андезитов) горных пород, являющихся естественными строительными материалами.

## ЛАБРАДОР

**Название** – дано по нахождению на полуострове Лабрадор в Северной Америке.

**Формула** –  $Ab_2An_3$ .

**Сингония** – триклинная. Кристаллы столбчатого таблитчато-призматического облика редки. Встречается обычно в виде зерен неправильной формы или в крупнозернистых агрегатах (XI, рис. 2). Лабрадор типичный широко распространенный плагиоклаз основного состава.

**Цвет** – зеленовато-серый до черного с синеватым отблеском (XI, рис. 2, 3).

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный.

**Прозрачность** – непрозрачный.

**Твердость** – 6–6,5.

**Плотность** – 2,7.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – неровный.

**Спайность** – совершенная в одном, иногда в двух направлениях.

### **Диагностические признаки**

**Особые свойства** – яркий синий отблеск (иризация) по плоскостям спайности.

**Химические свойства** – в кислотах растворяется. Минерал в процессе выветривания переходит в глинистый минерал – каолинит. Температура плавления 1550 °С (максимальная).

**Происхождение** – магматическое (входит в состав основных магматических горных пород – габбро, базальтов и метаморфических амфиболитов).

**Месторождения** – на Украине.

**Применение** – прекрасный и очень ценный поделочный камень и облицовочный строительный материал.

## АНОРТИТ

**Название** – получил название за его отчетливо выраженную триклинную симметрию: «ан» – греческая отрицательная приставка, а «орθος» – «прямой».

**Формула** –  $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ .

*Сингония* – триклинная. Встречается в кристаллах толсто-таблитчатого и таблитчато-призматического, коротко-игольчатого габитусов. Чаще в виде зерен и зернистых агрегатов. Внешне сходен с альбитом.

*Цвет* – бесцветный, белый, розовый, желтоватый, голубоватый, красноватый, обусловленный примесями.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – стеклянный.

*Прозрачность* – непрозрачный.

*Твердость* – 6–6,5.

*Плотность* – 2,7–2,8.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный.

*Спайность* – совершенная в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

### **Диагностические признаки**

Высокая твердость и низкая плотность.

*Химические свойства* – в кислотах растворяется. В процессе выветривания переходит в глинистые минералы. Температура плавления 1550 °С.

**Происхождение** – магматическое (в габбро и его аналогах), большое количество анортита встречается в контактово-метаморфизованных известняках.

**Месторождения** – на Украине, в Забайкалье и других местах.

**Применение** – главная часть эффузивных и интрузивных горных пород основного состава (габбро, базальтов, диабазов), являющихся естественными строительными материалами.

Минералы третьей *подгруппы «фельдшпатиды»* образуются тогда, когда магма содержит избыток щелочей и недосыщена кремнеземом. Они никогда не встречаются в равновесии с первичным кварцем, так как будут реагировать со свободным кремнеземом, образуя полевой шпат. Все фельдшпатиды относят к каркасным силикатам, хотя структуры их различны, наиболее распространенными для них являются кубическая и гексагональная системы (сингонии). Из фельдшпатидов опишем нефелин.

## НЕФЕЛИН

**Название** – от греч. «νεφέλη» – «облако» (при разложении в крепкой азотной кислоте  $\text{HNO}_3$  дает «облако» кремнезема). Синоним: элеолит (масляный камень).

**Формула** –  $\text{Na}[\text{AlSiO}_4]$ .

*Сингония* – гексагональная. Кристаллы призматического (рис. 78, а), короткостолбчатого, толсто-таблитчатого (рис. 78, б) габитусов встречаются редко, обычно распространены в виде неправильных зерен и их агрегатов, часто крупнозернистых (например, нефелиновые пегматиты – XI, рис. 4, с биотитом и морионом – XI, рис. 5). *Цвет* – бесцветный, белый с серовато-белым, розоватым, желто-бурым, красноватым, зеленоватым оттенками за счет примесей.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – стеклянный на гранях кристаллов, в изломе жирный.

*Прозрачность* – непрозрачный, бесцветный – прозрачный.

*Твердость* – 5,5–6.

*Плотность* – 2,5–2,6.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный.

*Спайность* – несовершенная, излом раковистый.

### **Диагностические признаки**

Высокая твердость, низкая плотность, жирный блеск.

*Химические свойства* – растворяется в кислотах. В соляной кислоте HCl выделяет студенистый осадок.

**Происхождение** – магматическое и метаморфическое. Нефелин распространен в щелочных магматических горных породах (нефелиновых сиенитах, недосыщенных кремнеземом базальтах и др.) и поэтому никогда в агрегатах не встречается вместе с кварцем.

**Месторождения** – Ильменские и Вишневые горы, Хибины (Кольский п.о.)

**Применение** – служит для получения алюминия, отходы от переработки нефелиновых руд используются для каменного литья. Минерал применяется в качестве сырья в стекольно-керамической, абразивной (получение искусственного корунда) и цементной промышленности, для получения соды и силикагеля (коллоидный кремнезем), глинозема, краски, как удобрение в сельском хозяйстве.

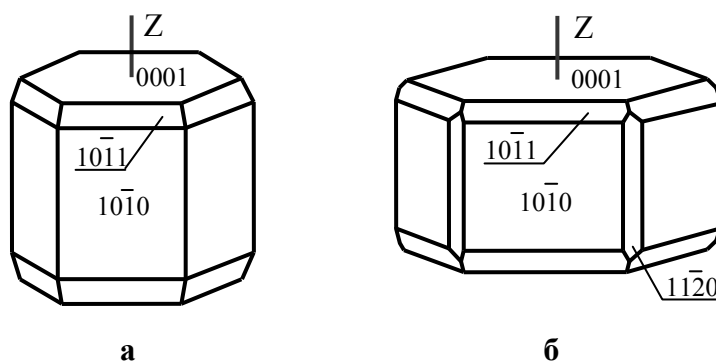


Рис. 78. Кристаллы нефелина: а – призматического; б – толсто-таблитчатого облика

## Подкласс ЦЕПОЧЕЧНЫЕ СИЛИКАТЫ

В цепочечных силикатах  $\text{SiO}_4$  тетраэдры образуют цепочки бесконечной протяженности. Выделяют два типа цепочек – одиночные и сдвоенные цепочки. С одиночными цепочками образуется группа пироксенов, у них каждый тетраэдр соединен со следующим кислородом, со сдвоенными цепочками – группа амфиболы, когда две соседние одиночные цепочки соединены тетраэдрами.

Минералы *группы «пироксенов»* по кристаллическим признакам подразделяются на ромбические и моноклинные пироксены. Представителем последних является авгит, ромбических – энстатит. В целом группа богата минеральными высокотемпературными видами, входящими в состав магматических (основных и ультраосновных горных пород) и самых глубинных, в высокой степени преобразованных метаморфических горных пород.

### АВГИТ

**Название** – от греч. «ἀβύνη» – «блеск», за сильный блеск на плоскостях спайности.

**Формула** –  $\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})[(\text{Si,Al})_2\text{O}_6]$ .

**Сингония** – моноклинная. Форма кристаллов коротко-призматическая (рис. 79, б; XII, рис. 1), призматическая (восьмиугольная), толстопластинчатая, в поперечном сечении кажется больше четырехугольной из-за их преобладания (рис. 79, а) но чаще встречается в виде зернистых скоплений – агрегатов (XII, рис. 2).

**Цвет** – зеленый до темно-черного, буровато-черный и бурый за счет примесей.

**Цвет черты** – серо-зеленый, светлый.

**Блеск** – стеклянный.

**Прозрачность** – непрозрачный.

**Твердость** – 5,5–6.

**Плотность** – 3,2–3,55, увеличивается с увеличением содержания железа.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – ступенчато-неровный до раковистого.

**Спайность** – совершенная по граням призмы.

#### **Диагностические признаки**

Характерны формы кристаллов, твердость и цвет. Лучше определяется под

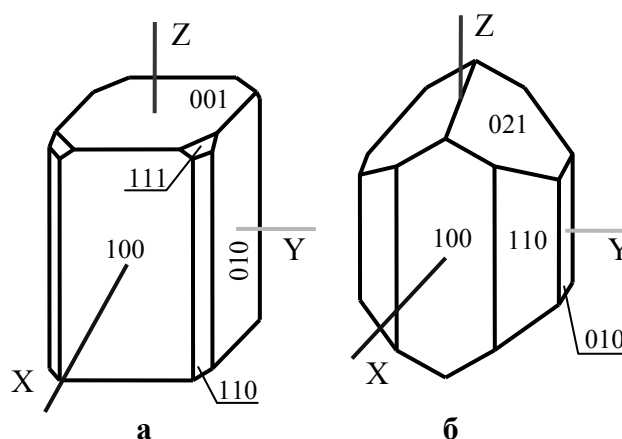


Рис. 79. Кристаллы авгита:  
а – призматического; б – коротко-призматического облика

микроскопом. При выветривании переходит в роговую обманку, серпентин, окислы железа.

*Химические свойства* – в кислотах на холоде не растворяется. Авгит полностью растворяется только в горячей соляной кислоте HCl.

**Происхождение** – распространенный минерал магматических (пироксенитов, перидотитов, габбро, базальтов) и метаморфических (скарны) горных пород.

**Месторождения** – Урал, Кольский полуостров и др.

**Применение** – авгит – главная составная часть основных и ультраосновных (интрузивных и эффузивных) и метаморфических горных пород, используемых в естественном виде, как строительные материалы, содержащий до 5% TiO<sub>2</sub>, применяется в качестве руды на титан.

## ЭНСТАТИТ

**Название** – от греч. «ένστατης» – «противный», из-за его тугоплавкости.

**Формула** – Mg<sub>2</sub>[Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>].

*Сингония* – кубическая. Правильные кристаллы призматического (XII, рис. 3), реже таблитчатого обликов (рис. 80).

*Цвет* – серовато-белый до бесцветного, чаще зеленый, желтый, бурый за счет примесей.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – стеклянный до перламутрового.

*Прозрачность* – непрозрачный.

*Твердость* – 5,5–6.

*Плотность* – 3,1–3,5.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный, больше ступенчатый.

*Спайность* – совершенная.

Чаще всего встречается в виде неправильных зерен – от мелких до крупных. Относится к ромбическим пироксенам. При вторичном изменении переходит в роговую обманку или антигорит (листоватую разновидность серпентина).

### **Диагностические признаки**

Высокая твердость, средняя плотность, окраска, излом.

*Химические свойства* – не растворяется в кислотах.

**Происхождение** – магматическое и метаморфическое. Вместе с оливином может образовывать перидотиты, габбро, отмечается в базальтах, андезитах, гнейсах и др.

**Месторождения** – Северный Кавказ, Сибирь, Урал.

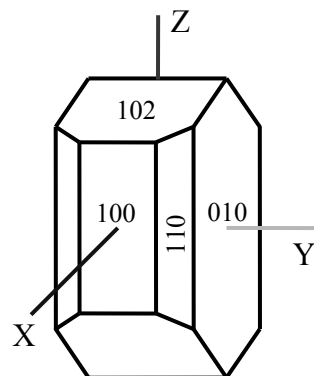


Рис. 80 Кристалл энстатита таблитчатого облика

**Применение** – за последние время энстатит нашел применение в фарфоровой промышленности.

### Подкласс ЛЕНТОЧНЫЕ СИЛИКАТЫ

По новой классификации минералы группы амфиболы стали относить к ленточным силикатам со сдвоенными цепочками. Они бывают ромбические и моноклинные, к последним относится роговая обманка. Охарактеризуем два порообразующих минерала: роговую обманку и актинолит.

### РОГОВАЯ ОБМАНКА

**Название** – роговая обманка, перевод немецкого слова «Mornblende», данного за сходство расщепленных кристаллов с рогом. Иногда называется обыкновенной роговой обманкой.

**Формула** –  $(Ca_2Na)(Mg,Fe^2)_4(Al,Fe^3)[(Si,Al)_4O_{11}]_2(OH)_2$ .

**Сингония** – моноклинная. Правильные кристаллы призматического, столбчатого облика с шестигранным поперечным сечением (рис. 81), реже изометрического, характерны двойники. Чаще всего встречается в виде неправильных разной крупности зерен и их агрегатов (ХП, рис. 4).

**Цвет** – зеленый или зеленовато-бурый до зеленовато-черного.

**Цвет черты** – зеленоватый или бурый.

**Блеск** – стеклянный.

**Прозрачность** – непрозрачный, полупрозрачный.

**Твердость** – 5,5–6.

**Плотность** – 3,0–3,4, увеличивается с увеличением содержания железа.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – занозистый, с выступами на плоскости излома наподобие «рогов».

**Спайность** – совершенная в двух направлениях.

#### **Диагностические признаки**

Характерны темный цвет, шестиугольное поперечное сечение кристаллов, цвет, характер излома. При выветривании минерал довольно устойчив.

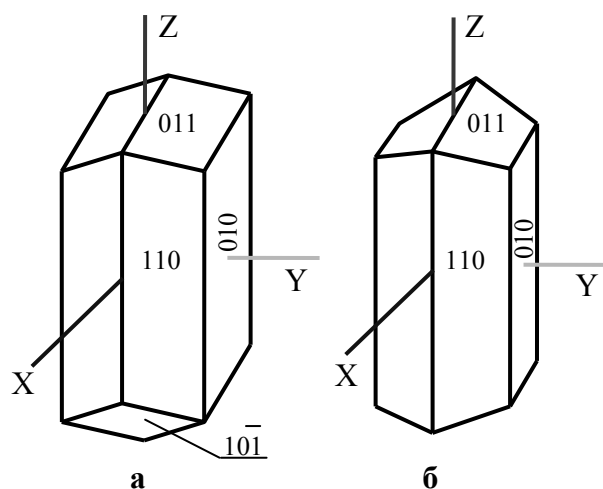


Рис. 81. Кристаллы роговой обманки: а – призматического; б – столбчатого обликов



*Химические свойства* – не растворима в воде и кислотах.

**Происхождение** – магматическое (диориты, сиениты и габбро), метаморфическое (амфиболиты, роговообманковые сланцы), контактово-метасоматическое (скарны).

**Месторождения** – Урал (гора Соколиная) и др.

**Применение** – может содержать 0,1–1,25%  $TiO_2$ , и тогда применяется как руда на титан. В других случаях роговая обманка и содержащие ее горные породы используют в качестве строительного материала. Сам по себе минерал практического значения не имеет. При обработке придает породе вязкость.

## АКТИНОЛИТ

**Название** – от греч. «ἀκτινος» – «луч» и «λίθος» – «камень», т.е. лучистый камень (XII, рис. 6).

**Формула** –  $Ca_2(Mg,Fe^2)_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$ .

*Сингония* – моноклинная. Форма игольчатая (рис. 82).

Актинолит – моноклинный амфибол (XII, рис. 5).

*Цвет* – зеленый, зеленовато-бурый до зеленовато-черного.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – стеклянный.

*Прозрачность* – непрозрачный.

*Твердость* – 5–6.

*Плотность* – 2,98–3,46, увеличивается с увеличением содержания железа.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – занозистый.

*Спайность* – совершенная в одном направлении (вдоль вытянутости минерала).

### **Диагностические признаки**

Чаще узнается по игольчатой форме кристаллов высокой твердости.

*Химические свойства* – нерастворим в воде и трудно растворим в кислотах.

**Происхождение** – метаморфическое – в актинолитовых сланцах, но наиболее часто в мраморах, серпентинитах. Минерал низкой и средней ступеней метаморфизма.

**Месторождения** – на Урале, к северу от Екатеринбурга.

**Применение** – практического применения не имеет. По ряду признаков актинолит подразделяется на разновидности: нефрит издавна применяется в ювелирном деле и как поделочный камень, амфиболовый асбест – огнеупорное и кислотоупорное волокно. Актинолит – породообразующий минерал.

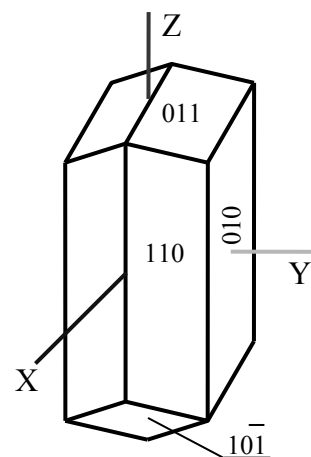


Рис. 82. Кристалл актинолита

## Подкласс СЛОИСТЫЕ СИЛИКАТЫ

### СЕРПЕНТИН

**Название** – волокнистая разновидность серпентина называется горный лен (серпентин-асбест, или хризотил-асбест). Название от лат. «serpens» – змея, за сходство сложенных им горных пород (серпентинитов) со змеиной кожей, называемых змеевиками.

**Формула** –  $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ .

**Сингония** – моноклинная. Форма волокнистая, пластинчатая. Обычно в виде мелких неправильных зерен. Серпентин весьма распространенный породообразующий минерал. Для него обычны плотные скрытокристаллические разновидности (XIII, рис. 2).

**Цвет** – темно-зеленый, в тонких сколах бутылочно-зеленый, желтовато-зеленый, буровато-зеленый, часто пятнистый, золотистый до зеленовато-черного.

**Цвет черты** – белый, зеленоватый.

**Блеск** – стеклянный, жирный, восковой.

**Прозрачность** – непрозрачный.

**Твердость** – 2,5.

**Плотность** – 2,3–2,7.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – раковистый.

**Спайность** – совершенная в одном направлении – у асбеста.

#### **Диагностические признаки**

Характерна окраска, напоминающая цвет кожи змеи (змеевик), низкая твердость.

**Химические свойства** – растворяется в соляной HCl и серной H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> кислотах, выделяя SiO<sub>2</sub>, к щелочам весьма устойчив.

**Происхождение** – метаморфическое (мраморы, серпентиниты), гидротермально-метаморфическое (магнезиальные карбонаты, тальк и др.) и магматическое – за счет ультраосновных пород.

**Месторождения** – Баженовское (Свердловская область), в Якутии и др. местах.

**Применение** – серпентин в чистом виде является поделочным и облицовочным материалом, по ценности следующий за малахитом. Как составная часть метаморфических пород (серпентинитов) может использоваться в естественном виде в качестве строительных материалов, в частности на изготовление огнеупорного кирпича и т.д.

## ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТ

**Название** – хризотил-асбест, или серпентин-асбест, происходит от греч. «χρυσος» – золото и «τιλος» – волокно, из-за шелковистого, иногда с золотистым оттенком блеска. Синоним – горный лен.

**Формула** –  $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ .

**Сингония** – моноклинная, характерны параллельно волокнистые агрегаты (XIII, рис. 1, 2). Представляет собой тонковолокнистый минерал. Расщепляется до волокон толщиной 0,0001 мм. Образует прожилки среди серпентина с поперечной ориентировкой волокон.

**Цвет** – золотисто-желтый, зеленовато-желтый, голубоватый, в распушенном виде – снежно-белый.

**Цвет черты** – белый, зеленоватый.

**Блеск** – шелковистый.

**Прозрачность** – непрозрачный.

**Твердость** – 2,5.

**Плотность** – 2,3–2,5.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – занозистый.

**Спайность** – весьма совершенная вдоль волокон.

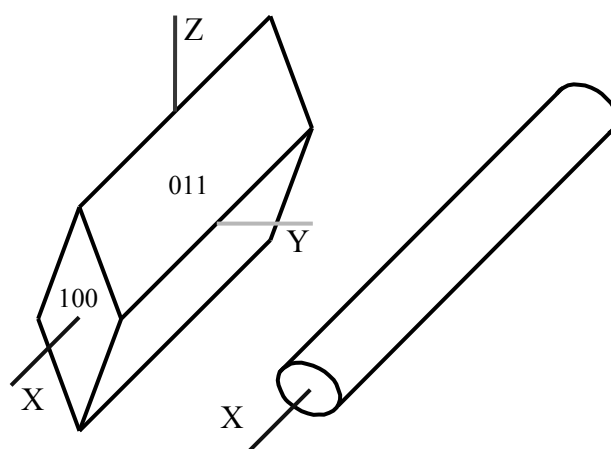


Рис. 83. Кристаллы хризотил-асбеста (волокно очень сильно увеличено)

### **Диагностические признаки**

Минерал тонковолокнистый с шелковистым блеском, низкая твердость, низкая плотность.

**Химические свойства** – растворяется в соляной и серной кислотах, тремолит (волокнистая разновидность хризотил-асбеста) в соляной кислоте HCl не растворяется.

**Происхождение** – связано с гидротермальными изменениями магматических ультраосновных пород. Встречается в серпентинитах в виде отдельных прожилков.

**Месторождения** – на Урале (Баженовское), в Восточных и Западных Саянах.

**Применение** – огнестоек, кислото- и щелочеупорен, плохой проводник тепла, электричества и звука. Гибкие и крепкие волокна перерабатываются в пряжу, подобно хлопку и шерсти, в результате чего появилась несгораемая одежда у пожарников. Асбестовые волокна вместе с цементом используются для изготовления прочных коррозионно-стойких труб, кафеля для пола и кровельной черепицы, прокладок, тормозных колодок. Волокна длиной более 1 см

применяются для изготовления нитей, эти же волокна служат для электрической изоляции. Короткие волокна, скрепленные портландцементом, идут для производства шифера, стальных панелей. Асбест используют в создании картона, бумаги, огнестойких красок для штукатурки. Добыча и применение асбесто-подобных минералов снизилось из-за их канцерогенности. Добыча асбеста небезопасное дело.

## МУСКОВИТ

**Название** – от лат. «vitrum muscoviticum» – «московское стекло» или от старинного итальянского наименования Москвы – «Муска».

**Формула** –  $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ .

**Сингония** – моноклинная. Кристаллы таблитчатого (XIII, рис. 3), короткостолбчатого или пластинчатого псевдогексагонального габитусов (рис. 84). Может встречаться в виде чешуек и чешуйчатых агрегатов.

**Цвет** – бесцветный, белый, иногда светло-зеленый, светло-бурый, красновато- или зеленовато-бурый за счет примесей.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – сильный стеклянный, перламутровый на плоскостях спайности.

**Прозрачность** – прозрачный, если бесцветный, полупрозрачный – окрашенный.

**Твердость** – 2,0–3,0 – на плоскости спайности, 4 – в крест спайности.

**Плотность** – 2,7–3,1.

**Хрупкость** – по спайности упругий.

**Излом** – в плоскости, перпендикулярной к спайности, неровный.

**Спайность** – весьма совершенная в одном направлении, вдоль пластинок.

### **Диагностические признаки**

Весьма совершенная спайность, дающая гибкие и упругие листы, из-за которых однозначно определяют мусковит как слюду, к этому нужно учесть еще окраску и низкую твердость. При ударе тупым тонким инструментом по плоскости спайности любой слюды образуется шестилучевой рисунок, с более отчетливой линией по сравнению с двумя другими, параллельными граням призмы.

**Химические свойства** – не растворяется в воде и кислотах. При температуре равной 850 °С теряет воду, а при температуре в диапазоне 1260–1290 °С плавится. При выветривании минерал устойчив, иногда может переходить в гидрослюда.

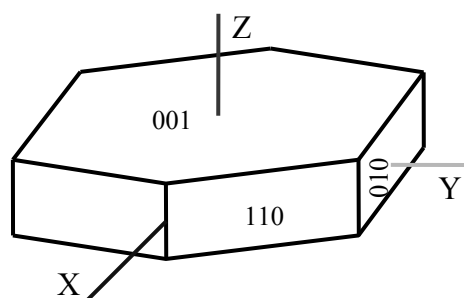


Рис. 84. Кристалл мусковита, биотита, талька и др., имеет таблитчатый облик

**Происхождение** – магматическое – встречается в гранитах и гранитных пегматитах (кристаллы могут быть до 3 м), гидротермальное (за счет разложения калиевых полевых шпатов), метаморфическое (здесь он представлен широко в гнейсах и сланцах низкой и средней ступени метаморфизма), осадочное (в песках).

**Месторождения** – известны в Восточной Сибири (р. Мама), в Карелии, на Урале.

**Применение** – мусковит благодаря ценным свойствам используется очень широко, он самый надежный и долговечный диэлектрик, применяемый в сложнейших энергетических установках, электронике, транзисторных приемниках, электрических выключателях. Около 90% листового мусковита используется в электропромышленности. Используется в индустрии строительных материалов, деревообрабатывающей промышленности, производстве автомобильных стекол. В металлургии вставляется в окна печей. Измельченный мусковит применяется при изготовлении толя, обоев, смазки, писчей бумаги, точильных камней, автомобильных шин, огнеупорных красок, а в склеенном и спрессованном виде (миканит) заменяет листовую слюду. Как составная часть многих пород, употребляется в виде естественного строительного материала, но наличие его в породе несколько снижает их прочность, ускоряя процесс разрушения.

## БИОТИТ

**Название** – получил по фамилии французского физика Ж. Био (1774–1862), изучавшего слюды. Синоним – железомagneзиальная слюда. Разновидность биотита – лепидомелан без магния, но в нем много железа.

**Формула** –  $K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ .

**Сингония** – моноклинная. Форма кристаллов – столбчатая, шестиугольная (XIII, рис. 4), таблитчатая (XIII, рис. 6), псевдогексагональная (рис. 84). Чаще в виде чешуек и их агрегатных скоплений (XIII, рис. 5).

**Цвет** – черный, реже бурый, иногда с оранжевым, красноватым, зеленоватым, золотистым оттенками.

**Цвет черты** – белый или зеленоватый.

**Блеск** – стеклянный, иногда перламутровый.

**Прозрачность** – в тонких листочках просвечивает (полупрозрачный).

**Твердость** – 2–3.

**Плотность** – 2,9–3,2, с увеличением содержания железа Fe увеличивается.

**Хрупкость** – нехрупкий, пластинки упругие.

**Излом** – в плоскости, перпендикулярной к спайности, неровный.

**Спайность** – весьма совершенная в одном направлении (вдоль пластинок).

### **Диагностические признаки**

По черному цвету биотит различается более определенно, а также по пластинчатости весьма совершенной спайности, низкой твердости и чаще низкой плотности.

*Химические свойства* – в концентрированной серной кислоте  $H_2SO_4$  полностью разлагается. Не растворяется в воде. При выветривании - может переходить в глинистый минерал – вермикулит и далее в хлорит.

**Происхождение** – составная часть глубинных магматических пород – гранитов, диоритов, сиенитов и излившихся вулканических пород – липаритов и трахитов, пегматитовое (в пегматитах), метаморфическое (в гнейсах, сланцах) и гидротермальное высокотемпературное (в грейзенах).

**Месторождения** – Урал (слюдорудник), Забайкалье, Алтай и др.

**Применение** – как составная часть магматических (гранитов, диоритов, липаритов и др.) и метаморфических горных пород (сланцев, гнейсов), используется в качестве естественных строительных материалов. Также является высококачественным изолятором, применяется для производства бронзовой краски и жаростойкой посуды. Он используется в промышленности подобно мусковиту. Биотит может выдерживать температуру до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Мусковит и биотит принадлежат к числу широко распространенных минералов (насчитывается 50 видов). Общая масса достигает 3,8% массы земной коры. Кристаллические структуры их однотипны. В них широко развит изоморфизм.

## ТАЛЬК

**Название** – от древнеарабского «талк». Синоним – мыльный камень.

Разновидности:

1. Плотная, сплошная разновидность талька называется стеатит (жировик), может быть зернистым, цвет белый, реже розовый.
2. Горшечный камень – смесь талька с хлоритом и слюдой, плотный (XIV, рис. 2).
3. Благородный тальк – слоистый тальк голубовато-зеленый с перламутровым блеском (XIV, рис. 1).

**Формула** –  $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$ .

*Сингония* – моноклинная. Форма кристаллов таблитчатая, листовая, псевдогексагональная (рис. 84). Обычно неправильная, в виде агрегатов мелких чешуек.

*Цвет* – белый, желтоватый, зеленоватый, голубоватый, реже темно-синий, темно-зеленый, коричневый и красноватый, за счет окрашивания окислами железа.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – перламутровый на плоскостях спайности, в других случаях матовый или жирный.

*Прозрачность* – полупрозрачный.

*Твердость* – 1, очень мягок. Эталонный минерал шкалы Мооса.

*Плотность* – 2,7–2,8.

*Хрупкость* – хрупкий, в тонких листочках гибкий, но не упругий.

*Излом* – по спайности ровный.

*Спайность* – весьма совершенная в одном направлении – вдоль табличек, листов.

### **Диагностические признаки**

Мыльный на ощупь, очень мягок, низкая твердость. В поверхностных условиях стоек.

*Химические свойства* – нерастворим в воде и кислотах.

**Происхождение** – тальк, продукт гидротермального изменения ультраосновных пород, богатых магнием. Может образовываться при метаморфизме доломитовых и глинистых пород, в результате образуются тальковые сланцы низкой и средней ступени метаморфизма.

**Месторождения** – Шабровское и Нижнеисетское месторождения (Свердловская область), около Челябинска, в Кемеровской области и других местах.

**Применение** – тальк пользуется самым широким спросом, является кислотоупорным и огнеупорным материалом, служит для изготовления электрических изоляторов. Используется в качестве машинной смазки, наполнителя в парфюмерно-косметической (пудра, мазь и др.), резиновой и целлюлозно-бумажной промышленности. Адсорбент, сырье для получения свето- и огнеупорной краски. Находит применение в кондитерском деле и в электронной технике. Плиты из талькового камня используются для электрораспределительных щитов и кислотоупорных покрытий столов и раковин.

## КАОЛИНИТ

**Название** – от китайского названия хребта Као-Линг (Высокая гора), где он был впервые обнаружен.

**Формула** –  $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$ .

*Сингония* – моноклинная. Кристаллические образования в виде тонких шестигонных (псевдогексагональных) хорошо образованных табличек (рис. 84) размером в 1 мкр = 0,001 мм, различимых только в микроскопе. Обычны землистые мягкие тонкочешуйчатые массы (XIV, рис. 4).

*Цвет* – белый, слегка желтоватый, буроватый, или голубоватый, зеленоватый за счет примесей.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – перламутровый (у чешуек), у землистых масс – матовый.

*Прозрачность* – непрозрачный.

*Твердость* – 1–2.

*Плотность* – 2,5–2,7.

*Хрупкость* – в сухом состоянии рассыпчатый, во влажном – пластичный.

*Излом* – землистый у землистых масс, у пластинок по спайности ровный.

*Спайность* – у пластинок весьма совершенная в одном направлении, у землистых масс отсутствует.

### **Диагностические признаки**

*Химические свойства* – разлагается в серной кислоте  $H_2SO_4$ . Минерал жадно поглощает воду (липнет к языку, пахнет глиной) и образует в воде пластичную массу. Способен содержать до 27% воды. Слабо набухает, не адсорбирует воду и различные растворимые в ней вещества. Каолинит, как вторичный минерал, химически устойчив, может только набухать или размокать. При выветривании твердеет и дает усадку. На ощупь жирный. Температура плавления 1500 °С.

**Происхождение** – гидротермальное при изменении полевых шпатов гранитов и гранитных пегматитов и экзогенное (образуется при выветривании полевых шпатов (XIV, рис. 3) и др. алюмосиликатов). Каолинит один из главных породообразующих минералов глин. Устойчив в кислой среде.

**Месторождения** – на Урале, в Подмосковье, Белоруссии и др. местах.

**Применение** – является важнейшим сырьем для фарфорофаянсовой, керамической, химической, текстильной, бумажной, электроизоляционной и красочной промышленности. Каолиновая вата используется в качестве теплоизоляционного материала в различных печах, газовых турбинах, топках, паровых котлах, камерах сжигания, трубопроводах перегретого пара. Из нее делают уплотняющие электроизоляционные прокладки, фильтры для горячих и химически агрессивных газов и жидкостей. Используется каолинит и в строительном деле как водозадерживающий (водоупорный) материал. Является связующим звеном для эмалей и лаков.

## МОНТМОРИЛЛОНИТ

**Название** – происходит от местечка Монтморильон во Франции, где впервые был описан и изучен.



**Формула** – химический состав непостоянен  $(Al,Mg)_2(OH)_2[Si_4O_{10}] \cdot nH_2O$ .

***Сингония*** – моноклинная. Минерал образует псевдогексагональные тонкие листочки, чешуйки и плотные землистые массы, которые встречаются чаще всего (XIV, рис. 5). Внутренняя структура из слоев-пакетов, которая устанавливается под электронным микроскопом, т.к. имеют размер – тысячные доли миллиметра, способные раздвигаться при поглощении воды или сближаться при ее удалении. Монтмориллонит широко распространен и является породообразующим минералом глин.

***Цвет*** – желтый, светло-зеленый, белый, розовый, коричневый, голубовато-серый и в большей степени зависит от примесей.

***Цвет черты*** – белый.

***Блеск*** – матовый.

***Прозрачность*** – непрозрачный в массе.

***Твердость*** – 1–2.

***Плотность*** – 2,6–2,9.

***Хрупкость*** – рассыпчатый.

***Излом*** – землистый у землистых масс и неровный у чешуек.

***Спайность*** – отсутствует у землистых разновидностей, у листочков – совершенная в одном направлении.

### **Диагностические признаки**

Облик глинистый. Мыльный на ощупь.

***Химические свойства*** – разлагается в серной кислоте  $H_2SO_4$  как и каолинит, химически устойчив. Может набухать и размокать, от влаги эта глина сильно увеличивается в объеме (в 20 раз), то есть набухает, к языку не прилипает.

***Происхождение*** – экзогенное – монтмориллонит чаще всего образуется при изменении горизонтов вулканического пепла, при выветривании основных (габбро, базальтов, базальтовых туфов) горных пород в щелочной среде. Бентонит – порода, в основном состоящая из монтмориллонита. Последний также является составляющей некоторых почв.

***Месторождения*** – на Кавказе, в Крыму, Прикарпатье, Средней Азии и др. местах.

***Применение*** – используется более чем в 200 отраслях народного хозяйства. Это великолепный адсорбент (очистка нефти, масел, соков, вин и т. д.), омыляющий материал (обезжиривание шерсти в текстильной промышленности и т.д.). Применяется в мыловарении, резиновой, текстильной и бумажной промышленности, в керамическом производстве, пищевой промышленности, в медицине (изготовление лекарств), сельском хозяйстве (удобрение и добавка в

корм скоту). С помощью монтмориллонита смягчают жесткость воды, готовят глинистые буровые растворы, придают бетону водостойкость. Из-за способности к сильному разбуханию строительство на них не производят или их удаляют при выемке грунта.

## ВЕРМИКУЛИТ

**Название** – происходит от лат. «vermiculus» – «червячок», при нагревании из пластинок вермикулита образуются длинные червеобразные столбики и нити.

**Формула** –  $(\text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3[(\text{Al, Si})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

**Сингония** – моноклинная. Слюдopodobный минерал, который является продуктом выветривания биотита. Встречается в виде достаточно крупных кристаллов – пакетов слюды (XIV, рис. 6), а также псевдоморфоз по биотиту и флогопиту, которые при расслаивании увеличивают первоначальный объем минерала в 20–30 раз, чешуйчатые агрегаты.

**Цвет** – золотисто-желтый, бронзово-желтый, бурый и др.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный, на плоскостях спайности жирный, перламутровый (но слабее, чем у слюд), иногда матовый.

**Прозрачность** – непрозрачный.

**Твердость** – 1,5–2.

**Плотность** – 2,4–2,7.

**Хрупкость** – листочки не упругие, ломкие, рассыпаются на чешуйки.

**Излом** – землистый у землистых масс и неровный у чешуек.

**Спайность** – совершенная в одном направлении.

### **Диагностические признаки**

Очень низкая твердость, царапается ногтем, низкая плотность, пахнет глиной.

**Химические свойства** – в кислотах растворяется с синим окрашиванием раствора и осаждением кремнезема в виде порошка.

Вода начинает удаляться из вермикулита даже при комнатной температуре. Нагревание ведет к дальнейшему ее удалению с максимумом выделения при 150, 250 и 750–800 °С. Нагретый вермикулит увеличивается в объеме в 15–30 раз. По составу и структуре сходен больше с тальком, чем с монтмориллонитом.

**Происхождение** – встречается в зоне коры выветривания биотитов (гидротации), а также при гидротермальном изменении биотитовых и флогопитовых пород или серпентинитов.

**Месторождения** – Вишневые горы (Челябинская область), Кольский полуостров, на Слюдянке (Иркутская область).

**Применение** – во вспученном виде он применяется как тепло- и звукоизоляционный материал в самолетостроении и других отраслях промышленности. Его добавляют в цемент и штукатурку, что делает их легкими. Это легкий строительный материал. После обжига минерал приобретает красивую золотистую или серебристую окраску и применяется в производстве обоев, способен к более высокому катионному обмену, чем монтмориллонит. Разбухающий вермикулит добавляют в почву, что улучшает ее качество.

## Подкласс ОСТРОВНЫЕ СИЛИКАТЫ

### ОЛИВИН

**Название** – от лат. «oliva» – «маслина» (за сходство с оливково-зеленым цветом), является промежуточной разновидностью в сплошном изоморфном ряду от чистого железистого фаялита до магнезиального форстерита.

**Формула** –  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$ .

**Сингония** – ромбическая. Правильные кристаллы встречаются весьма редко в виде короткопризматического, с хорошо выраженной дипирамидой, уплощенного до таблитчатого облика (рис. 85). Обычно в природе менее совершенен (XV, рис. 1), чаще распространен в сплошных зернистых агрегатах (XV, рис. 2) или в виде вкраплений зерен. В магматических породах в виде округлых зерен.

**Цвет** – обычно оливково-зеленый или желтый с зеленоватым оттенком, бывает бесцветным. Прозрачная ювелирная разновидность оливина, окрашенная в желто-зеленый цвет, называется хризолитом – «золотой камень» (от греч. «χρυσος» – «золото» и «λίθος» – «камень»).

**Цвет черты** – белый или серый.

**Блеск** – сильный стеклянный, жирный.

**Прозрачность** – непрозрачен, бесцветный оливин – прозрачен.

**Твердость** – 6,5–7, у серпентинизированных разновидностей ниже.

**Плотность** – 3,3–3,5.

**Хрупкость** – хрупкий.

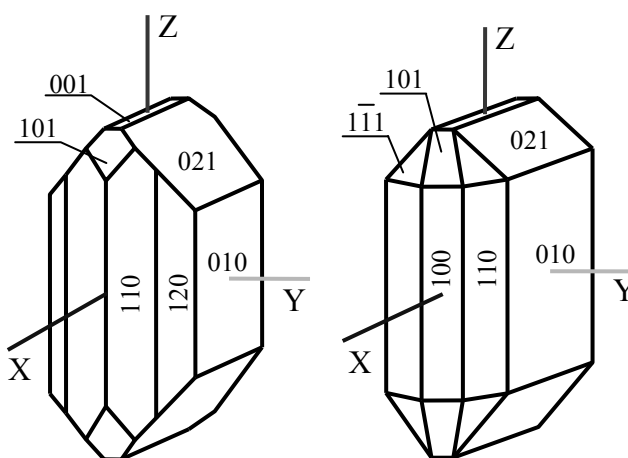


Рис. 85. Кристаллы оливина

*Излом* – раковистый до неровного.

*Спайность* – несовершенная, практически нет.

### Диагностические признаки

Характерен цвет оливина и характер зерен, отличающихся от других породообразующих минералов.

*Химические свойства* – холодная соляной кислоте HCl на оливин почти не действует, растворяется в горячей (особенно в порошке) в пропорции 1:1. В концентрированной серной кислоте H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> происходит быстрое его разложение (с выделением студенистого осадка SiO<sub>2</sub>). Мало устойчив в природе и переходит в серпентин, асбест, тальк, гематит, магнетит, магнезит и лимонит.

*Происхождение* – оливин – типичный минерал основных и ультраосновных магматических пород (дунитов, перидотитов, туфов, габбро, базальтов и др.). Распространен в каменных и каменно-железных метеоритах.

*Месторождения* – Урал, Таймыр, Северный Кавказ, Восточная Сибирь. Оливин обнаружен в лунном грунте, доставленном на Землю «Луной-16».

*Применение* – оливин – главная составная часть дунитов (80–100%) и оливин-пироксеновых перидотитов – ультраосновных горных пород, используемых как сырье для производства огнеупоров, технического стекла, строительного камня, применяется и как магнезиальное удобрение. Его благородная разновидность – хризолит используется в ювелирном деле в качестве драгоценного камня.

## ТОПАЗ

*Название* – по острову Топазос в Красном море (место первой находки).

*Формула* – Al<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>](F,OH)<sub>2</sub>.

*Сингония* – ромбическая. Хорошие кристаллы довольно редки (XV, рис. 3).

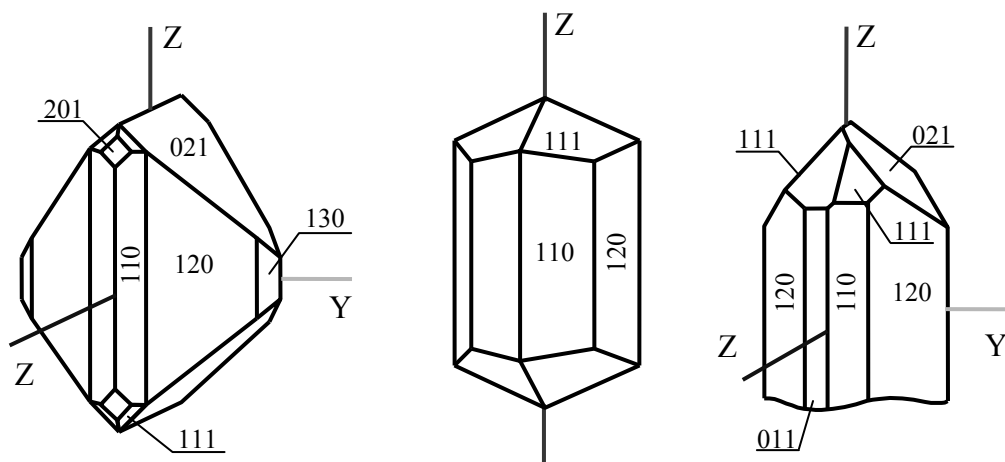


Рис. 86. Кристаллы топаза

Габитус правильных кристаллов призматический или столбчатый (рис. 86), в пустотах кристаллы крупные, до гигантских весом 25–30 кг и даже до нескольких сотен килограммов, обычно с клиновидными концами. Чаще же всего он образуется в виде крупных или мелких зерен неправильной формы, изредка порошковых землистых масс. Минерал относится к драгоценным камням II класса, если его кристаллы прозрачные, бесцветные или окрашенные в голубой, розовый или в винно-желтый цвет.

*Цвет* – винно-желтый, желтый, голубоватый, фиолетовый, зеленоватый, розовый, редко – красный, иногда бесцветный. Цвет зависит от примесей. Например, желтый (от  $Fe^{2+}$ ), винно-желтый до розового (от  $Fe^{2+}$  или  $Cr^{+V}$ ).

*Цвет черты* – не дает, царапает плитку.

*Блеск* – стеклянный.

*Прозрачность* – прозрачный или полупрозрачный минерал до непрозрачного.

*Твердость* – 8, режет стекло. Является эталонным минералом шкалы Мооса.

*Плотность* – 2,4.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – раковистый.

*Спайность* – совершенная в одном направлении, поперек столбчатых кристаллов.

#### **Диагностические признаки**

При прокаливании желтые топазы приобретают розовую или красную окраску.

*Химические свойства* – частично разлагается только в серной кислоте  $H_2SO_4$ , в других – вообще не растворяется. При процессах выветривания весьма устойчив, поэтому может образовывать россыпи.

*Происхождение* – магматическое (встречается в кислых породах, особенно в пустотах липаритов – гранитов и др.), пегматитовое (в пегматитах), гидротермальное (в высокотемпературных кварцевых жилах). Получают его и искусственным путем.

*Месторождения* – на Урале, в Забайкалье, на Дальнем Востоке и др. местах. Минерал средней распространенности.

*Применение* – прозрачный топаз разнообразных окрасок обрабатывается как драгоценный камень в ювелирной промышленности.

## КЛАСС ФОСФАТЫ

Это соли фосфорных кислот (их 350 минералов). Содержание их в земной коре около 1%, которое уступает лишь минералам класса силикатов. Большинство минералов редкие. Наибольшее распространение имеет апатит.

## АПАТИТ

**Название** – от греч. «απαταω» – «обманываю». Его часто принимают за другие минералы, особенно его кристаллы.

**Формула** –  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$ . Выделяют фторапатит  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F})_2$ , хлорапатит  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{Cl})_2$  и гидроксилапатит  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{OH})_2$  – как его самостоятельные разновидности. Для характеристики предлагаем фторапатит, легко распознаваемый микроскопически.

**Сингония** – гексагональная. Форма кристаллов – обычно дипирамиды (XVI, рис. 1), удлиненные или короткие, шестигранная призма, короткостолбчатая и таблитчатая формы (рис. 87). Но широко распространен в виде волокнистых, лучистых, зернистых масс (XVI, рис. 2, 3), плотных агрегатов с почковидной, шаровидной поверхностью – фосфоритов – скоплений апатита, включений песчинок кварца, кальцита и др. (XVI, рис. 4, 5), иногда в виде землистых масс.

**Цвет** – бесцветный (прозрачный), белый, голубой, чаще голубовато-зеленый до изумрудно-зеленого, голубой, желтый, оранжевый, коричневый до коричнево-красного, бурый, фиолетовый.

**Цвет черты** – серый, еле заметный.

**Блеск** – стеклянный, жирный на изломе.

**Прозрачность** – непрозрачный, в бесцветных кристаллах – прозрачный.

**Твердость** – 5, является эталонным минералом в шкале Мооса.

**Плотность** – 3,1–3,2.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – неровный, редко – раковистый.

**Спайность** – совершенная, параллельно граням призмы.

### **Диагностические признаки**

Узнается по сахаровидному облику, когда он образован зернистыми массами. От кварца отличается цветом и твердостью.

**Химические свойства** – растворим в азотной  $\text{HNO}_3$ , серной  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , соляной  $\text{HCl}$  кислотах. Продукты выветривания апатита неизвестны. Температура плавления  $1615^\circ\text{C}$ .

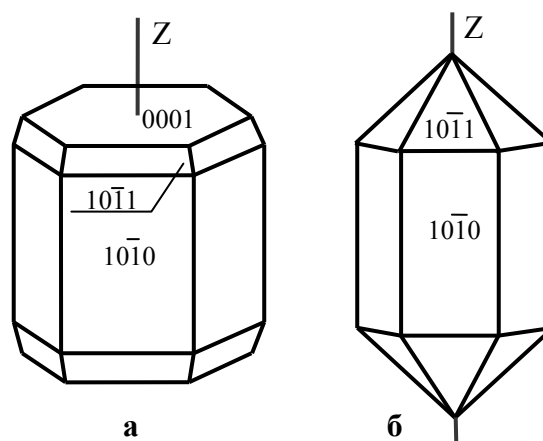


Рис. 87. Кристаллы апатита:  
а – шестигранная призма; б – дипирамидально-призматический удлиненный

**Происхождение** – магматическое (минерал характерен для кислых, средних и основных пород, как интрузивных, так и вулканических), пегматитовое, гидротермальное, экзогенное (осадочное – фосфориты). Минерал имеет широкое распространение.

**Месторождения** – Кольский полуостров, Урал, Забайкалье, Поволжье, Украина и др.

**Применение** – называют «хлебным камнем» – он необходим для получения удобрений (суперфосфатов). Из отходов производства фосфорных удобрений изготавливают фосфорное стекло, пропускающее ультрафиолетовые лучи. Получают также сорта стекол, задерживающих инфракрасные тепловые лучи. Применение фосфорного стекла дает возможность принимать солнечные ванны в помещении, наблюдать доменный процесс. Некоторые сорта фосфорного стекла выдерживают нагревание до 800 °С. Фосфатные минералы находят применение в керамической промышленности для получения «костяного фарфора», в литейном деле придают литью большую текучесть, и, таким образом, литье хорошо заполняет формы. В химической промышленности апатит используют для получения фосфора, фосфорной кислоты и других соединений фосфора, которые применяются в спичечной, керамической, текстильной, пищевой промышленности, военном деле, медицине. Насчитывается более ста отраслей народного хозяйства, где используются эти вещества.

## КЛАСС СУЛЬФАТЫ

Сульфаты – это соли серной кислоты (их более 300 минералов). Общее содержание в земной коре не более 0,1%. В основном эти минералы являются сульфатами Na, K, Mg, Ba и других элементов. Для них характерны малая плотность (за исключением барита) и светлая окраска. Твердость небольшая. Это продукты выпадения из водных растворов. Наибольшее распространение имеют гипс, ангидрит и барит. При контакте с водой ангидрит переходит в гипс, увеличиваясь в объеме до 33%. И, наоборот, при потере воды гипс переходит в ангидрит. Это типичные осадочные образования.

## ГИПС

**Название** – имеет греческое происхождение, в глубокой древности оно применялось для обозначения самого минерала или продуктов его обжига. Синонимы: легкий шпат, гипсовый камень, штукатурка и др.

**Формула** –  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

**Сингония** – моноклинная. Форма кристаллов обычно таблитчатая (XVII, рис. 3), реже призматическая, столбчатая (рис. 88, а), иногда в виде двойников «ласточкин хвост» (рис. 88, б), волокнистая – селенит (XVII, рис. 4), в виде характерных друз «гипсовых цветов» (XVII, рис. 1, 2, 4, 5, 6). Обычны же плотные тонкие полупрозрачные кристаллически-зернистые агрегаты (алебастр). Гипс – главный породообразующий минерал горной породы с таким же названием, а также присутствует в глинах, мергелях, песках и т.д.

**Цвет** – белый, серый, у волокнистой разновидности гипса (селенита) – белый, розовый. Бывает пластинчатым, бесцветным (прозрачный гипс – «марьино стекло»), желтым, бурым, красным, серым, черным из-за примесей.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный с перламутровым отливом.

У пластинчатого гипса и волокнистой разновидности (селенита) – шелковистый.

**Прозрачность** – полупрозрачный или прозрачный минерал.

Бесцветный пластинчатый гипс.

**Твердость** – 2,0 – у гипса, 1,5–2,0 – у селенита.

Гипс эталонный минерал шкалы Мооса.

**Плотность** – 2,3.

**Хрупкость** – весьма хрупкий.

**Излом** – ровный, раковистый и занозистый – у шестоватых агрегатов, в кристаллах ступенчатый.

**Спайность** – весьма совершенная в одном направлении – пластинчатый гипс и совершенная в трех направлениях – исландский шпат.

### **Диагностические признаки**

Гипс – мягкий минерал (царапается ногтем), узнается среди других кристаллов по двойникам («ласточкин хвост»), низкой плотностью, по блеску, когда он волокнистый, и пластинчатый – стеклянный с перламутровым отливом.

**Химические свойства** – слабо растворяется в кислотах. Гипс довольно быстро растворяется в воде (в 400 частях воды растворяется приблизительно одна часть гипса), вода из-за растворения гипса нередко обладает постоянной сульфатной жесткостью. Растворимость зависит от температуры. При нагревании до 60–70 °С гипс медленно, а выше 90 °С быстрее начинает превращаться в полугидрат  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , известный как «обожженный гипс», который доводят до

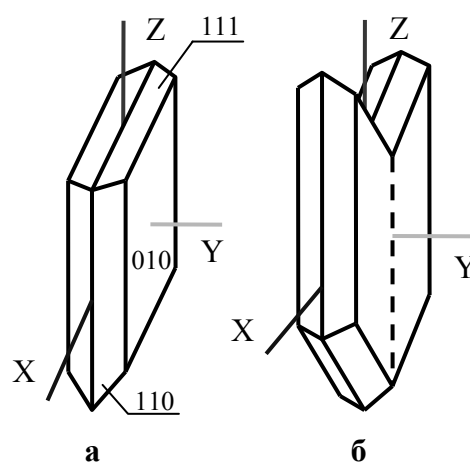


Рис. 88. Кристаллы гипса:  
а – монокристалл гипса;  
б – двойник – «ласточкин хвост»



температуры 190–200 °С, и он, обезвоживаясь при дальнейшем повышении температуры, образует ангидрит CaSO<sub>4</sub>. Прокаленный при температуре около 150 °С и смоченный водой каменеет. Температура плавления 900 °С.

**Происхождение** – экзогенное – химическим путем выпадает в осадок в лагунах морей, озерах, а также при соединении ангидрита с водой в результате образуются мощные толщи осадочных пород аналогичного названия – гипс, переслаивающиеся с известняками, глинами, при испарении морской воды он отлагается первым, затем ангидрит, галит и т.д., изредка гидротермальное.

**Месторождения** – на Урале, Северном Кавказе, в Средней Азии, Западном Приуралье, Архангельской области, Донбассе и др. Здесь гипс является породообразующим минералом ценной породы того же названия.

**Применение** – применяется в архитектурном и строительном деле – изготавливают строительные детали: карнизы, плиты, блоки, барельефы. Обожженный гипс применяется в качестве вяжущего вещества, добавляется к портландцементному клинкеру для замедления схватывания. Волокнистая разновидность – селенит (от греч. «σεληνη» – «Луна», за сходство с ее блеском) обладает шелковистым блеском, иногда красивым лунным отливом и является поделочным камнем. Селенит и другие разновидности гипса используют для изготовления декоративной настольной скульптуры малых форм. Из гипса и ангидрита (безводного гипса) получают серу, применяют их в бумажной промышленности, в медицине, в сельском хозяйстве в качестве удобрения, в производстве серной кислоты, цемента, эмалей, глазурей и красок. Прозрачный пластинчатый гипс используется в оптике. Но примесь гипса в материалах может быть вредной, например: в стекольном песке, гончарной глине и т.д.

## АНГИДРИТ

**Название** – от греч. «αν» – «отрицание» и «υωωρ» – «вода», т.е. «безводный».

**Формула** – CaSO<sub>4</sub>.

**Сингония** – ромбическая. Форма толстотаблитчатая (рис. 89, а), короткостолбчатая или призматическая (рис. 89, б). Но в кристаллах встречается редко. Обычно наблюдается в сплошных грубо- и тонко-зернистых (XVIII, рис. 1, 2) и землистых массах, волокнистый, радиально-лучистый.

**Цвет** – бесцветный, белый, часто с голубым, фиолетовым, сероватым, иногда красноватым оттенками, обусловленными примесями.

**Цвет черты** – белый или серовато-белый.

**Блеск** – стеклянный, перламутровый.

*Прозрачность* – полупрозрачный, иногда в бесцветных кристаллах бывает прозрачным.

*Твердость* – 3,5.

*Плотность* – 2,9–3,0.

*Излом* – неровный, зернистый, в крупных зернах ступенчатый.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Спайность* – совершенная по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

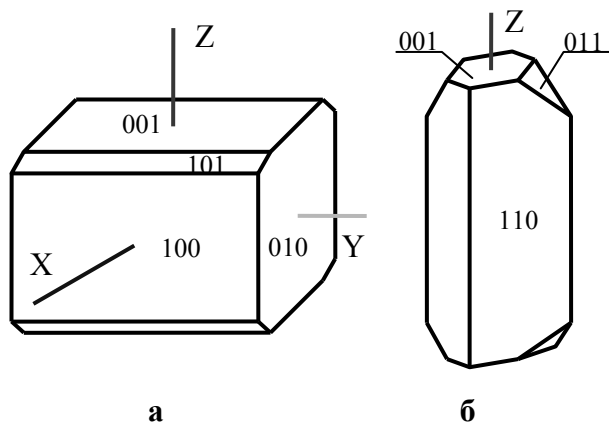


Рис. 89. Кристаллы ангидрита:  
а – толстотаблитчатый, б – призматический

### **Диагностические признаки**

*Химические свойства* – в порошке реагирует с HCl, с концентрированной серной кислотой  $H_2SO_4$ . Ангидрит разлагается щелочами. При выветривании слабоустойчив, растворим в воде. Если гидратируется, то переходит в гипс, увеличиваясь в объеме до 30%. Температура плавления  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ .

*Происхождение* – экзогенное (продукт химических осадков, формирующихся в лагунных и отмирающих морских бассейнах), очень редко гидротермальное (выпадает из морских растворов в присутствии NaCl и MgCl при  $t = 25\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$ ). Почти всегда находится с гипсом и образует с ним совместные переслаивающиеся залежи. Ангидрит – это породообразующий минерал, но может быть аксессуарным (второстепенным) минералом в осадочных горных породах.

*Месторождения* – в Донбассе (Артемовск), Приуралье и в др. местах.

*Применение* – в качестве специального вяжущего вещества (цемента), является удобрением, сырьем для получения серы и серной кислоты. Используется как поделочный камень. В целом применение ангидрита такое же, как и гипса.

## БАРИТ

*Название* – от греч. «βαρος» – «тяжелый». Синоним – тяжелый шпат, за большую плотность и способность раскалываться на пластинки.

*Формула* –  $BaSO_4$ .

*Сингония* – ромбическая. Обычны кристаллы таблитчатого, реже – призматического и столбчатого облика (рис. 90), возможны сростки уплощенных кристаллов, друзы. Встречается в виде плотных, грубозернистых, мелкозернистых (XVIII, рис. 4, 5, 6) или землистых масс, корок, натёков. Очень характерны конкреции. Кристаллы чистого барита водяно-прозрачные.

*Цвет* – белый либо бесцветный, благодаря примесям бывает окрашен в бурый (глинистые минералы), красный (гидроокислы железа), зеленоватый, голубой, желтый, черный (битуминозные вещества) и другие цвета.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – стеклянный, перламутровый.

*Прозрачность* – полупрозрачный или непрозрачный.

*Твердость* – 3–3,5.

*Плотность* – 4,3–4,7. Легко отличается от сходных по облику (кальцита, доломита) высокой плотностью.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный.

*Спайность* – совершенная в одном направлении параллельно основанию кристалла.

#### **Диагностические признаки**

Характерна высокая плотность (тяжелый), средняя твердость, форма кристаллов, нерастворимость в воде.

*Химические свойства* – в кислотах, кроме концентрированной серной кислоты  $H_2SO_4$  и щелочах нерастворим, даже в горячих. В природе химически устойчив, поэтому, кроме коренных месторождений, встречается в россыпях. Температура плавления 1300 °С.

*Происхождение* – главным образом гидротермальное (в жилах), при низких и средних температурах, прожилках, линз, в трещинах, экзогенное (осадочное). Барит химически устойчив, поэтому кроме коренных месторождений встречается в россыпях.

*Месторождения* – главным образом Южный и Полярный Урал, Алтай и др.

*Применение* – в химической промышленности для получения препаратов бария, используется в бурении как утяжелитель буровых растворов, как составная часть штукатурки рентгеновских кабинетов, в лакокрасочной и полиграфической промышленности, для приготовления красок, глазури, линолеума, резинового, бумажного производстве, некоторых видах пластических масс и смол, пиротехнике, медицине, сельском хозяйстве для получения удобрений и т.п.

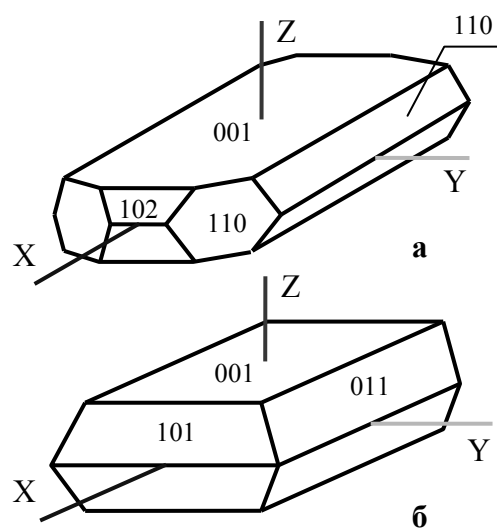


Рис. 90. Кристаллы барита:  
а – призматический,  
б – толстотаблитчатый

## КЛАСС КАРБОНАТЫ

Соли угольной кислоты. Их более 80 минералов. Они составляют 1,0% массы земной коры. Выделяются как безводные, так и водные карбонаты.

Для характеристики выделены главным образом безводные карбонаты, из водных только малахиты:

1. Кальцит  $\text{CaCO}_3$ .
2. Магнезит  $\text{MgCO}_3$ .
3. Доломит  $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$ .
4. Малахит  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ .

Они являются естественными строительными материалами и сырьем для производства ряда искусственных строительных материалов. Происхождение их экзогенное и связано с водными растворами. В контакте с водой карбонаты снижают свою прочность, со временем растворяются, разрушаются в кислотах. Рассмотрим только главных представителей этих групп и в том порядке, как они записаны: кальцит, магнезит, доломит, малахит.

### КАЛЬЦИТ

**Название** – от лат. «calx» – «известь». Синоним – известковый шпат. Бесцветная прозрачная разновидность кальцита, иногда выступающая в виде друзы, называется исландским шпатом (обладает двойным лучепреломлением).

**Формула** –  $\text{CaCO}_3$ .

**Сингония** – тригональная. Кристаллы кальцита имеют самый разнообразный облик. Установлено 80 различных ромбоэдров, свыше 200 скаленоэдров и более 1000 их комбинаций. Встречаются таблитчатые, пластинчатые (XIX, рис. 4), призматические (XIX, рис. 1) или столбчато-ромбоэдрические кристаллы (рис. 91).

Выделяются сплошные зернистые агрегаты (XIX, рис. 5) и землистые массы, друзы (XIX, рис. 3), натёки, корочки и др.

**Цвет** – бесцветный, белый, серый, желтый, зеленый, голубой, фиолетовый, синий, темно-бурый до черного, обусловлен примесями.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный, может быть матовым, перламутровым.

**Прозрачность** – полупрозрачный в тонких сколах крупнозернистой массы, разновидность – исландский шпат, прозрачный.

*Твердость* – 3, эталонный минерал шкалы Мооса. В зависимости от направления твердость может меняться – от 2,5 до 3,5.

*Плотность* – 2,6–2,72.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – ступенчатый и ровный в кристаллах и зернистый – в зернистых агрегатах.

*Спайность* – совершенная по ромбоэдру в трех направлениях.

### Диагностические признаки

*Особые свойства* – бурно

реагирует с разбавленной (10%) соляной кислотой, возникает эффект «вскипания» – выделяется двуокись углерода  $\text{CO}_2$  даже на холоде. Порошок кальцита, смешанный с 10% раствором хлорного железа, при встряхивании выделяет  $\text{CO}_2$  и окрашивается в темно-бурый цвет, затем превращается в студенистую массу. Доломит такой реакции не дает. Для диагностики крупнозернистых кальцита и доломита можно использовать и метод С.В. Тихомирова. Поверхность образца покрывается на две минуты фиолетовыми чернилами, разбавленными соляной кислотой  $\text{HCl}$  до их позеленения или посинения. На кальците пятно станет снова фиолетовым, а на доломите дольше останется зеленым. При удалении чернил фильтровальной бумагой кальцит будет фиолетовым, а доломит бесцветным. Температура плавления  $1340^\circ\text{C}$ .

*Химические свойства* – слабо растворим в воде, в присутствии в воде углекислого газа растворимость улучшается. Благодаря кальциту вода может обладать карбонатной жесткостью. При выветривании химически не устойчив.

Происхождение – гидротермальное (известковый туф), метаморфическое (мраморы, скарны), осадочное (известняки, доломиты, мел), биохимическое (известняки-ракушечники).

Месторождения – в Крыму, Якутии, на Северном Кавказе, Грузии, Армении, Средней Азии, Белоруссии, Восточной Сибири, Ленинградской области.

Применение – кальцит, образуя горные породы, используется в производстве строительных материалов (для изготовления стеновых блоков, плит, ступеней, облицовки, бутового камня и щебня при дорожном строительстве, наполнителя

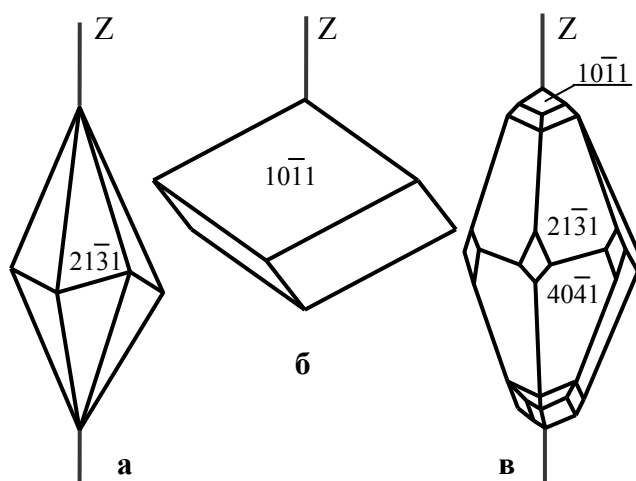


Рис. 91. Кристаллы кальцита: а – тригональный скаленоздр, б – исландский шпат – ромбоэдр, в – комбинация ромбоэдра с призмой и дипирамидой

бетона и др.). Известняк находит применение в химической промышленности (цемент, известь, стекло, сода) и в черной и цветной металлургии в качестве флюса. Как исходный материал, известняки используются также для получения резины, извести, пластиков. Рыхлые известняки используются как писчий мел, для изготовления зубного порошка, красок, замазок и т.д. Для известкования почв – молотый известняк. Минеральная добавка в корм скота и птицы. Прозрачная бесцветная разновидность – исландский шпат является оптическим сырьем. Он обладает двойным лучепреломлением (удваивает изображения), прозрачен почти для всех длин волн. Эти свойства используются в различных оптических приборах, астрономических измерительных инструментах, квантовых генераторах, радиоэлектронике, вычислительных устройствах, медицинской аппаратуре, в голографии и лазерной технике. В настоящее время исландский шпат в большом количестве выращивается искусственным путем.

## МАГНЕЗИТ

**Название** – получил по области Магнезия в Греции, где он впервые был описан, или в связи с химическим составом. Синонимы: горькая соль, горький шпат.

**Формула** –  $MgCO_3$ .

**Сингония** – тригональная. Кристаллы не характерны. Изредка встречаются вытянутые ромбоэдрические или призматические кристаллы (рис. 92). Облик правильных кристаллов – притупленно-ромбоэдрический. Но чаще распространен в виде плотных разнозернистых агрегатов, напоминающих мрамор (XX, рис. 1) или мелоподобных масс. Может быть аморфным (XX, рис. 2). В природе распространен меньше, чем кальцит. Двойников у магнезита нет.

**Цвет** – бесцветный, белый, серый, желтый до бурого.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный, матовый.

**Прозрачность** – минерал в зернах непрозрачен, в кристаллах прозрачен до полупрозрачного (в краях зерен).

**Твердость** – 3,5–4,5.

**Плотность** – 2,9–3,1 (чистый), может увеличиваться при замещении магнезия железом.

**Хрупкость** – хрупкий.

**Излом** – у аморфного магнезита раковистый и зернистый у кристаллического. У отдельных зерен – ступенчатый.

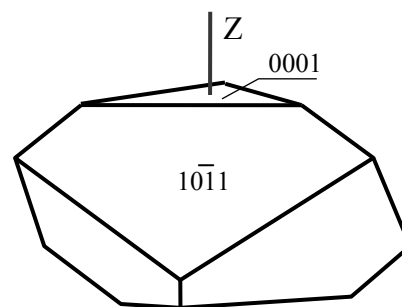


Рис. 92. Кристалл магнезита, доломита

*Спайность* – в кристаллических разностях совершенная по ромбоэдру в трех направлениях.

**Диагностические признаки**

Не образует двойников. Температура плавления более 1500 °С. Встречается кристаллическим и аморфным. В природе не устойчив.

*Химические свойства* – медленно разлагается холодными кислотами, но в порошке легко растворяется со вскипанием в нагретой соляной кислоте HCl. В воде слабо растворим.

**Происхождение** – метаморфическое (в сланцах, мраморах, серпентинитах) и экзогенное (образуется в доломитах при выветривании). В магматических породах встречается как вторичный минерал.

**Месторождения** – на Южном Урале, Иркутской области, Дальнем Востоке и др.

**Применение** – для изготовления высококачественных огнеупорных кирпичей, которые выдерживают температуру свыше 3000 °С, цемента Сореля, используемого для точильных кругов, стойкой штукатурки, получения металлического магния. Применяется в сахарной, резиновой, бумажной, химической промышленности, в производстве электроизоляторов, служит для получения вяжущих веществ. Используется в авиационной промышленности в виде металлических сплавов с алюминием.

## ДОЛОМИТ

**Название** – дано по имени французского минералога Деодата Доломье.

**Формула** –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

*Сингония* – тригональная. Часто встречающиеся кристаллы имеют ромбоэдрический габитус, иногда с изогнутыми гранями (седловидные формы), а также призматические или таблитчатые (рис. 92). Образует двойники. Агрегаты зерен (XX, рис. 3) встречаются чаще, чем кристаллы, имеют место мелкоподобные массы.

*Цвет* – серовато-белый, серый, иногда с желтоватым, красным, буроватым или зеленоватым оттенком, редко черный, зависит от примесей.

*Цвет черты* – белый.

*Блеск* – стеклянный, перламутровый.

*Прозрачность* – минерал непрозрачен в зернистых массах.

*Твердость* – 3,5–4 (в зависимости от направления).

*Плотность* – 2,8–2,9; для чистого доломита – 2,85.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – зернистый в агрегатных образованиях и землистый в рыхлых мелоподобных массах. По направлениям спайности – ровный.

*Спайность* – совершенная в трех направлениях по ромбоэдру.

### **Диагностические признаки**

Для диагностики крупнозернистых доломитов рекомендуется метод С.В. Тихомирова (стр. 205).

*Химические свойства* – так же, как и магнезит, не вскипает при действии холодной 10% соляной кислоты HCl. Вскипает в порошке, при нагревании 10% соляной кислоты растворяется легко. При выветривании слабо устойчив. Слабо растворим в воде.

**Происхождение** – экзогенное (типичный породообразующий минерал осадочных пород – доломитов), метаморфическое (мраморы), гидротермально-метасаматическое-эндогенное (доломитизированные известняки). Образует кристаллы в серпентинитах и в измененных изверженных породах основного состава.

**Месторождения** – на Урале, в Донбассе, Поволжье, Сибири и на Кавказе и др.

**Применение** – сплошные массы доломита употребляются в качестве строительных материалов: магнезиальных цементов, минваты. В промышленном и жилищном строительстве в качестве бутового, стенового и облицовочного материала, в строительстве дорог – в виде крупного камня, щебня и крошки. Абразивный материал, наполнитель резины, бумаги. Доломитовая мука в смеси с другими компонентами служит мастикой для закупорки швов. Как удобрение используется в сельском хозяйстве. Используется как огнеупорный материал (для обкладки внутренних поверхностей мартеновских и электросталеплавильных печей и др.) и в качестве флюса в металлургии; является сырьем в химической промышленности, стекольном производстве и др.

## МАЛАХИТ

**Название** – минерал получил от греч. «μαλαχη» – «мальва», по сходству с цветом листа растением мальва. Синонимы: медная зелень, малахитовая зелень.

**Формула** –  $\text{Cu}_2(\text{CO})_3 \cdot (\text{OH})_2$ .

*Сингония* – моноклиная. Изредка встречается в кристаллах коротко- или длиннопризматического, игольчатого, радиально-лучистого габитусов. Имеются двойники (рис. 93). Обычны натечные (XX, рис. 5, 6), почковидные, гроздевидные агрегаты, землистые массы, налеты, корки, примазки.



*Цвет* – ярко-зеленый, изумрудно-зеленый.

*Цвет черты* – бледно-зеленый.

*Блеск* – стеклянный, шелковистый.

*Прозрачность* – непрозрачный, в тонких пластинках прозрачный.

*Твердость* – 3,5–4.

*Плотность* – 3,9–4,1.

*Хрупкость* – хрупкий.

*Излом* – неровный, раковистый.

*Спайность* – средняя (ясная).

#### **Диагностические признаки**

Распознается по ярко-зеленому цвету, обычно с полосчатостью, а также по формам выделения (гроздевидному габитусу). Температура плавления 1150 °С.

*Химические свойства* – легко растворяется в соляной кислоте HCl (со вскипанием), при обильном добавлении аммиака раствор окрашивается в синий цвет.

**Происхождение** – гипергенное (поверхностное, экзогенное), в результате окисления медных сульфидных руд, а также в медистых песчаниках. Поэтому минерал вторичный.

**Месторождения** – на Урале месторождения малахита отработаны, разрабатывается месторождение в Казахстане.

**Применение** – красивый поделочный и декоративный камень. Малахитом облицованы колонны Исаакиевского собора и малахитовый зал Зимнего дворца в Санкт-Петербурге. Землистые разновидности его идут на изготовление красок.

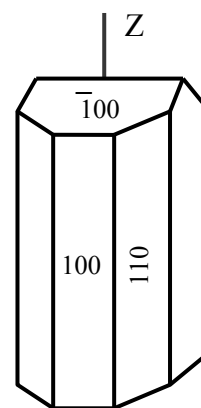


Рис. 93. Сдвойникованный кристалл малахита

## IV. ГАЛОГЕНИДЫ

### КЛАСС ГАЛОИДЫ

Соли хлористой и фтористой кислот. Рассмотрим только два минерала: галит NaCl, флюорит CaF<sub>2</sub>.

Галоидные соединения в основном связаны с водными растворами поверхности Земли, а также с магматическими, гидротермальными, пневматолитовыми процессами. Наибольшее распространение имеют галит и флюорит.

## ГАЛИТ

**Название** – от греч. «γᾶλῆ» – «соль». Синонимы: каменная соль (в плотных кристаллических массах) и самосадочная соль (в рыхлых кристаллических массах на морском дне).

**Формула** – NaCl – галоид (безводный).

**Сингония** – кубическая. Форма кристаллов, как правило, кубическая, кубооктаэдрическая (рис. 94, а), встречаются довольно часто, а чисто октаэдрическая (рис. 94, б) – очень редко. Грани кристаллов часто ступенчатые. Редко отмечаются кристаллы воронкообразные, столбчатые, волокнистые, пластинчатые, напоминающие ступеньки (XXI, рис. 1), встречаются в налетах, корочках, друзах (XXI, рис. 2). Обычны рыхлые или плотные агрегаты кристаллических зернистых масс (XXI, рис. 3), от мелкозернистых до крупнозернистых. В осадочных породах галит может залегать пластами или в форме потоков, куполов, подобно магматическим породам, и называется каменной солью.

**Цвет** – или белый, или обычно бесцветный, примеси же окрашивают галит в серый, желтый, бурый, черный цвета. Иногда наблюдается интенсивная синяя окраска в виде пятен и полос, она может возникнуть за счет деформации слоев соли или за счет облучения радиоактивными лучами  $K^{40}$  и  $Rb^{87}$ , или за счет примесей (например, от рассеянного металлического натрия).

**Цвет черты** – белый до бесцветного.

**Блеск** – стеклянный или перламутровый на плоскостях спайности, шелковистый в волокнистых агрегатах, от механических примесей матовый.

**Прозрачность** – минерал полупрозрачен в тонких сколах зернистых масс или прозрачен в чистых кристаллах.

**Твердость** – 2–2,5.

**Плотность** – 2,1–2,2.

**Хрупкость** – очень хрупок.

**Излом** – неровный, раковистый или зернистый (в плотной массе).

**Спайность** – весьма совершенная в трех направлениях по кубу.

### Диагностические признаки

Из характерных свойств галита необходимо отметить сильно соленый вкус,

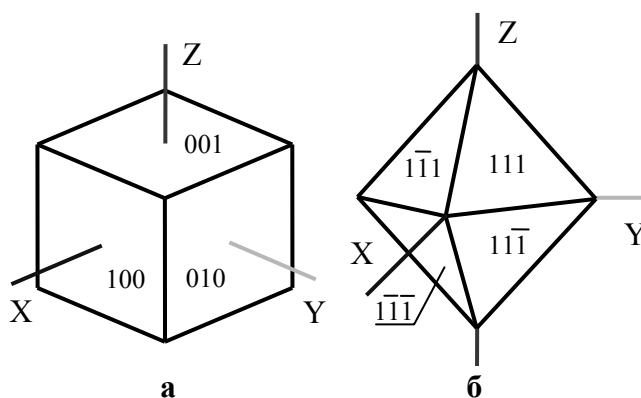


Рис. 94. Кристаллы галита:  
а – куб; б – октаэдр

низкую твердость и плотность, кубическую форму, совершенную спайность. Температура плавления 800 °С. Ухудшает строительные свойства.

*Особые свойства* – галит хорошо растворяется в воде (320–350 г/л), обладает антисептическими свойствами (поэтому необходим для консервирования).

**Происхождение** – экзогенное – хемогенное (в усыхающих морских бассейнах или мелководных лагунах, заливах) наряду с другими хлоридами. Считается, что сложенные им крупные пласты образовались при испарении морской воды.

**Месторождения** – в крупных скоплениях в Соликамске, на Южном Урале, Донбассе, на Таймыре, самосадочная соль в озерах Баскунчак и Эльтон и др.

**Применение** – при изготовлении более полутора тысяч различных изделий, без галита не обходится почти ни одна отрасль промышленности. Соль используется как важнейший пищевой продукт (среднее потребление соли 7–10 кг на человека в год), для консервирования мяса и рыбы, в холодильном деле. Используется для высаливания мыла и органических красок, для соления кож. В металлургии – для хлорирующего обжига, в керамической промышленности – для глазурования глиняных изделий, в медицине, производстве алюминия и хлорной извести, для очистки газов – гелия, неона, аргона. Галит служит сырьем для получения соляной кислоты, рудой для получения металлического натрия и хлора, а также всех соединений этих элементов. Металлический натрий применяется для получения сплавов, как восстановитель в металлургии, в качестве катализатора в производстве органических соединений. В электропромышленности – для изготовления проводов (натриевые «жилы», покрытые медной оболочкой) и разрядных ламп. Натриевые лампы применяются для уличного освещения, они в два раза ярче и почти в три раза долговечнее ртутных, повышают контрастность предметов. Натрий служит катализатором при получении синтетического каучука. Перекись натрия регенерирует воздух в кабинах космических кораблей и в подводных лодках. Облако паров натрия, выпущенных из космической ракеты, позволяет определить её местоположение и уточнить траекторию полета. Установлено, что 1 мм<sup>2</sup> каменной соли способен хранить до миллиарда единиц информации, что позволяет использовать крупинцы соли в электронике. Натриево-серная аккумуляторная батарея способна запасать в пять раз больше энергии, чем свинцово-кислородная батарея равного веса. Натриевый теплоноситель используется в атомных реакторах. Галит добавляют в бетон для снижения температуры его застывания и в буровые растворы, используется для борьбы с гололедом, посыпая им шоссейные и пешеходные дороги.

## ФЛЮОРИТ

Эта группа объединяет несколько минералов. Представляем характеристику только флюорита.

**Название** – от лат. «fluere» – «течь», дает легкоплавкие смеси со многими минералами и применяется в качестве плавня (флюса), а с учетом того, что при раскалывании он дает пластинки (брусочки) появился синоним – плавиковый шпат.

**Формула** –  $\text{CaF}_2$  – фторид.

**Сингония** – кубическая. Облик кристаллов обычно кубический (рис. 95, а), реже октаэдрический (рис. 95, б) или сложные комбинации этих форм, часто образующих друзы (XXI, рис. 4). Высокие температуры способствуют образованию кристаллов октаэдрического облика, а низкие – кубического. Грани куба всегда гладкие и блестящие, а октаэдра – неровные и тусклые. Чаще же всего флюорит отмечается в виде вкраплений зерен, сплошных зернистых (XXI, рис. 6) и плотных масс, а также в виде двойников контактного типа (XXI, рис. 5).

**Цвет** – чистый флюорит бесцветный и водянисто-прозрачный, но обычно он желтый, зеленый, голубой, белый, фиолетовый, фиолетово-черный, это обусловлено примесями.

**Цвет черты** – белый.

**Блеск** – стеклянный.

**Прозрачность** – полупрозрачный, в чистых кристаллах бывает прозрачным.

**Твердость** – 4, легко царапается иглой или ножом. Он эталонный минерал шкалы Мооса.

**Плотность** – 3,18–3,2.

**Хрупкость** – минерал хрупок.

**Излом** – неровный или иногда раковистый.

**Спайность** – весьма совершенная по граням октаэдра.

### **Диагностические признаки**

**Особые свойства** – флюоресценция (свечение), улавливается приборами. При радиоактивном облучении флюорит светится фиолетовым, синим и зеленоватым цветом. Минерал начинает светиться также при нагревании (термолюминесценция). Характерна октаэдрическая спайность, флюорит тверже кальцита и не реагирует с соляной кислотой  $\text{HCl}$ .

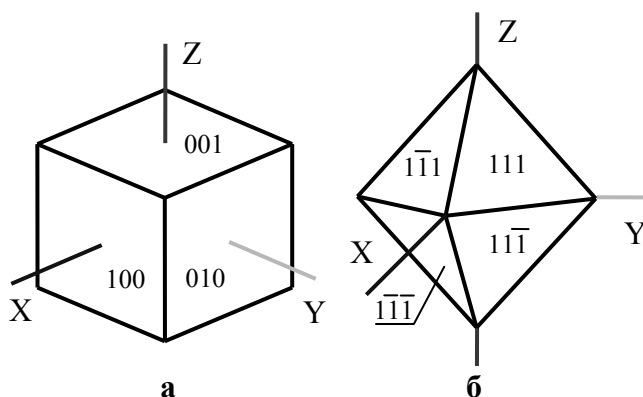


Рис. 95. Кристаллы флюорита:  
а – куб; б – октаэдр

*Химические свойства* – при нагревании слабо разлагается в соляной кислоте, а в серной кислоте растворяется с выделением HF, не растворяется в воде, поэтому минерал в природе устойчив.

**Происхождение** – очень часто гидротермальное (в кварцевых жилах): являясь жильным минералом, нередко флюорит слагает их основную массу, в осадочных породах (экзогенное), реже – в пустотах и трещинах отдельности магматических пород (гранитах и пегматитах), – и пневматолитовое (в грейзенах).

**Месторождения** – в Восточном Забайкалье, Московской и Калининградской областях и др. местах.

**Применение** – примерно 70% добываемого флюорита используется в качестве флюса в металлургической промышленности для ускорения плавления железных и алюминиевых руд, в его присутствии плавка металлов идет быстрее, топлива требуется меньше, шлаки становятся более текучими и легче отделяются от металла. В химической промышленности из него получают препараты фтора, плавиковую кислоту. Бездефектный, чистый, бесцветный и прозрачный флюорит – ценное оптическое сырье для многочисленных оптических приборов, в том числе приборов ночного видения. Получают его и искусственно; служит для керамической промышленности, получения эмалей, глазурей, цветных стекол и т.д. Употребляется как поделочный камень.

## УКАЗАТЕЛЬ ФОТОГРАФИЙ МИНЕРАЛОВ ПО КОЛЛЕКЦИЯМ

### *Коллекция ТюмГАСУ:*

II, рис. 3, 5	XII, рис. 2, 4–6
III, рис. 2, 3, 5	XIII, рис. 2, 3, 5, 6
IV, рис. 1–3, 5, 6	XIV, рис. 2, 4–6
V, рис. 1–4	XV, рис. 2
VI, рис. 1, 3, 6	XVI, рис. 1–5
VII, рис. 1–6	XVII, рис. 2–4
VIII, рис. 4, 5	XVIII, рис. 1–6
IX, рис. 2–5	XIX, рис. 1, 2, 4, 5
X, рис. 2, 3, 6	XX, рис. 1–3, 5
XI, рис. 1, 3–5	XXI, рис. 2, 3, 5, 6

### *Коллекция В.К. Коркунова*

II, рис. 1, 2	X, рис. 1, 4
III, рис. 1, 4	XI, рис. 2
IV, рис. 4	XIII, рис. 4
V, рис. 5, 6	XVII, рис. 5
VI, рис. 2, 4, 5	XX, рис. 4, 6
VIII, рис. 1–3	XXI, рис. 4

### *Коллекция А.П. Мишукова*

XV, рис. 4–6	XXI, рис. 1
XIX, рис. 6	

### *Другие источники:*

II, рис. 4	XIV, рис. 1, 3
IX, рис. 1	XV, рис. 1, 3
X, рис. 5	XVII, рис. 1
XII, рис. 1, 3	XIX, рис. 3
XIII, рис. 1	

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алисон, А. Геология – наука о вечно меняющейся Земле / А. Алисон, Д. Пальмер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 568 с.
2. Генезис минеральных индивидов и агрегатов (онтогенез минералов) : сборник статей / ред. Д. П. Григорьева. – Академия наук СССР и др. – М. : Наука, 1966. – 300 с.
3. Годовиков, А. А. Минералогия / А. А. Годовиков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Недра, 1983. – 647 с.
4. Дир, У. А. Породообразующие минералы : в 5 т. / У. А. Дир, Р. А. Хауи, Д. Ж. Зусман ; пер. с англ. – М. : Мир, – 1965–66. – 5 т.
5. Кантор, Б. Э. Минерал рассказывает о себе / Б. Э. Кантор. – М. : Недра, 1985. – 150 с.
6. Костов, И. Минералогия / И. Костов ; пер. с англ. – 3-е изд. – М. : Мир, 1971. – 559 с.
7. Кузин, М. Ф. Полевой определитель минералов / М. Ф. Кузин, Н. И. Егоров. – М. : Недра, 1974. – 232 с.
8. Ларионов, А. К. Основы минералогии, петрографии и геологии : учебник / А. К. Ларионов, В. П. Ананьев. – 2-е изд. – М. : Высшая школа, 1969. – 464 с.
9. Минералы и горные породы СССР : справочник-определитель / Т. Б. Здорик, В. В. Матиас, И. Н. Тимофеев, Л. Г. Фельдман. – М. : «Мысль», 1970. – 440 с.
10. Новые идеи в генетической минералогии : сборник статей / Академия наук СССР и др. – Ленинград : Наука. Ленинградский отдел, 1983. – 121 с.
11. Панюков, П. Н. Основы геологии : учебник для вузов / П. Н. Панюков, З. Г. Перфильева. – М. : Недра, 1968. – 351 с.
12. Поваренных, А. С. Минералогия: прошлое, настоящее, будущее / А. С. Поваренных, В. И. Оноприенко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 160 с.
13. Пронин, Л. А. Основы геологии : учебник для вузов / Л. А. Пронин. – Свердловск : Средне-Уральское книжное изд-во, 1985. – 305 с.
14. Соседков, Э. С. Минералы и их свойства : учебное пособие к курсу «Инженерная геология» / Э. С. Соседков, С. П. Игашева. – Тюмень : ТюмГАСУ. – 2003. – 54 с.
15. Старков, В. Д. Геология и геоморфология : учебник / В. Д. Старков, Л. А. Тюлькова. – Тюмень : ФГУИПП, 2004. – 384 с.

16. Шаскольская, М. П. Кристаллография : учебник для вузов / М. П. Шаскольская. – М. : Высшая школа, 1976. – 391 с.
17. Шафрановский, И. И. Евграф Степанович Федоров (1853-1919) / И. И. Шафрановский. – М. : Академия наук СССР, 1963. – 284 с.
18. Шафрановский, И. И. Краткий курс кристаллографии : учебник для негеолог. спец. вузов / И. И. Шафрановский, В. Ф. Алявдин. – М. : Выс. школа, 1984. – 120 с.
19. Шафрановский, И. И. Лекции по кристалломорфологии : учебное пособие для студентов геолог. спец. вузов / И. И. Шафрановский. – М. : Высш. школа., 1968. – 173 с.
20. Каталог Минералов [Электронный ресурс] : [минерал, драгоценные камни, полудрагоценные, месторождения полезных ископаемых]. – Режим доступа: <http://www.catalogmineralov.ru>. Проверено 11.05.2008.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<b>Часть I. Основы кристаллографии .....</b>	<b>5</b>
<i>Глава первая.</i> Кристаллография, предмет изучения, состав и связь с другими науками .....	7
<i>Глава вторая.</i> Зарождение, рост и растворение кристаллов .....	11
Зарождение кристаллов .....	11
Рост кристаллов .....	12
Растворение кристаллов .....	17
Понятие о кристаллическом веществе и кристаллах .....	18
<i>Глава третья.</i> Пространственная решетка и структура кристаллов .....	24
Закон постоянства углов кристаллов – первый закон кристаллографии .....	27
<i>Глава четвертая.</i> Симметрия кристаллов .....	32
Кристаллографические категории, сингонии и оси координат .....	40
<i>Глава пятая.</i> Формы кристаллов .....	48
Простые формы сингоний низшей категории .....	50
Простые формы сингоний средней категории .....	52
Простые особые формы сингоний средней категории .....	58
Простые формы сингоний высшей категории .....	59
<i>Глава шестая.</i> Закон целых чисел .....	65
Оси и параметры граней .....	65
Индексы и символы граней .....	67
<i>Глава седьмая.</i> Формы реальных кристаллов .....	72
<i>Глава восьмая.</i> Сведения о структурах кристаллов .....	77
Сведения о кристаллохимии .....	80
Физико-химические типы связей в кристаллических структурах .....	82
Металлическая связь .....	83
Ковалентная связь .....	83
Ионная связь .....	84
Связь Ван-дер-Ваальса .....	85
Изоморфизм .....	85
Полиморфизм .....	88
Тематика практических занятий по кристаллографии .....	91
Вопросы для самопроверки .....	92
<b>Часть II. Основы минералогии .....</b>	<b>95</b>
<i>Глава девятая.</i> Общие сведения о минералах .....	97
Происхождение породообразующих минералов .....	98
Эндогенные процессы минералообразования .....	100
Пегматитовый процесс минералообразования .....	102
Пневматолитовое и гидротермальное минералообразование .....	102
Экзогенные процессы минералообразования .....	103
Метаморфизм .....	104

Важнейшие структуры минералов .....	105
Химический состав и формулы минералов .....	106
Классификация минералов .....	110
Название минералов .....	114
<i>Глава десятая. Физические свойства минералов</i> .....	116
Внешние диагностические признаки главнейших породо- образующих минералов ( <i>теоретическая часть</i> ) .....	116
Морфологические свойства. Внешняя форма минералов .....	116
Оптические свойства минералов .....	117
Механические свойства минералов .....	123
Особые свойства минералов .....	131
Вопросы для самопроверки .....	132
<i>Глава одиннадцатая. Способы определения внешних признаков на образцах минералов (практическая часть)</i> .....	133
Морфологические свойства минералов .....	134
Оптические показатели минералов .....	137
Механические свойства минералов .....	139
Особые свойства минералов .....	144
Определение и описание минералов .....	145
Вопросы для самопроверки .....	151
Домашнее задание .....	152
<i>Глава двенадцатая. Характеристика минералов</i> .....	154
I. Простые вещества .....	154
Класс Самородные элементы .....	154
Сера .....	154
Графит .....	156
II. Сернистые соединения и их аналоги .....	157
Класс Сульфиды .....	157
Пирит .....	158
Халькопирит .....	159
Галенит .....	161
Киноварь .....	162
III. Кислородные соединения .....	163
Класс Окислы (Оксиды) .....	163
Кварц .....	164
Халцедон .....	166
Корунд .....	167
Гематит .....	168
Магнетит .....	170
Класс Гидроокислы (Гидроксиды) .....	171
Опал .....	171
Лимонит .....	173
Класс Силикаты .....	174

Подкласс Каркасные силикаты .....	174
Ортоклаз .....	174
Микроклин .....	176
Альбит .....	177
Андезин .....	178
Лабрадор .....	179
Анортит .....	179
Нефелин .....	180
Подкласс Цепочечные силикаты .....	182
Авгит .....	182
Энстатит .....	183
Подкласс Ленточные силикаты .....	184
Роговая обманка .....	184
Актинолит .....	185
Подкласс Слоистые силикаты .....	186
Серпентин .....	186
Хризотил-асбест .....	187
Мусковит .....	188
Биотит .....	189
Тальк .....	190
Каолинит .....	191
Монтмориллонит .....	192
Вермикулит .....	194
Подкласс Островные силикаты .....	195
Оливин .....	195
Топаз .....	196
Класс Фосфаты .....	197
Апатит .....	198
Класс Сульфаты .....	199
Гипс .....	199
Ангидрит .....	201
Барит .....	202
Класс Карбонаты .....	204
Кальцит .....	204
Магнезит .....	206
Доломит .....	207
Малахит .....	208
IV. Галогениды .....	209
Класс Галоиды .....	209
Галит .....	210
Флюорит .....	212
Приложение 1. Указатель фотографий минералов по коллекциям .....	214
Список литературы .....	215

Учебное пособие для студентов негеологических высших учебных заведений

Соседков Эльферий Семенович, Максименко Елена Константиновна

## **ОСНОВЫ КРИСТАЛЛОГРАФИИ И МИНЕРАЛОГИИ**

Редактор – Тарасова И.О.

Компьютерная верстка – Максименко Е.К.

Дизайн обложки – Никифорова А.Ю.

Подписано в печать 6.02.2009

Формат 60x90/8

Усл. печ. л. 30,2

Тираж 115

Заказ № 500