

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Т.Е. Мартынова**

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ОБЩЕЙ МИНЕРАЛОГИИ**

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

Издательство  
Томского политехнического университета  
2013

УДК 549(075.8)

ББК 26.31я73

М29

**Мартынова Т.Е.**

М29 Конспект лекций по общей минералогии: учебное пособие / Т.Е. Мартынова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 79 с.

В пособии дано понятие симметрии кристаллов и ее элементов, рассмотрены особенности и природа изменчивости химического состава минералов, приведено описание свойств и форм выделения минеральных образований, рассмотрены генетические процессы эндогенного и экзогенного минералообразования.

Пособие поможет студентам понять логику и последовательность макроскопического описания минералов при их диагностике на лабораторных занятиях и при самостоятельной работе.

Пособие предназначено для студентов, изучающих минералогию.

**УДК 549(075.8)**

**ББК 26.31я73**

*Рецензенты*

Доктор геолого-минералогических наук, профессор ТГУ

*А.И. Чернышов*

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент ТГУ

*О.В. Бухарова*

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Мартынова Т.Е., 2013

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2013

## Предмет минералогии

Минералогия, одна из очень давних отраслей знания принадлежит к разряду наук геологических; она изучает не только состав и свойства минералов, но и историю их в земной коре. Современную минералогию мы рассматриваем как химию земной коры; минералы изучаются в их многообразном историческом развитии. Для поверхностного наблюдателя минералогические процессы незаметны; представление о минералах обычно складывается, как о веществах неизменных, тогда как в действительности эти вещества подвержены самым разнообразным превращениям. В зависимости от условий и обстановки, в которых находятся минералы, с ними происходят постоянные видоизменения. В ходе различных физико-химических процессов минералы рождаются, существуют и разрушаются. Геологическая жизнь минералов весьма длительна. Она может продолжаться в течение геологических эпох, периодов и даже эр, т. е. определяться десятками и сотнями млн. лет. Кажущиеся устойчивостью и неизменностью минерала будут представлять лишь явления относительные. В науке настоящего времени минерал рассматривается как тело, устойчивое лишь на временном этапе своего состояния, но минерал неизбежно подвергнется тому или иному изменению, коль скоро произойдут изменения среды, его окружающей.

Современная минералогия изучает химические соединения недр Земли, она неизбежно связывается с геохимией, которая изучает историю химических элементов в земной коре. Точно так же минералогия находится в теснейшей связи с петрографией и петрологией, изучающими горные породы. Вследствие того, что подавляющее большинство минералов представляют полезные ископаемые, минералогия тесно связана с экономикой и с различными отраслями техники и народного хозяйства. Минералогия – наука огромного практического значения. Изучение отдельных месторождений минерального сырья приводит к взаимосвязи ее и с географией.

Совершенно особняком стоит связь минералогии с кристаллографией. Кристаллография не принадлежит к числу дисциплин геологических, она занимает совершенно самостоятельное место среди физических наук. Кристаллография изучает природу, свойства и форму твердых тел; минералогия касается кристаллографии постольку, поскольку значительное количество минералов является веществами кристаллическими. И долгое время учение о кристаллах развивалось параллельно с минералогией, т. к. единственными объектами кристаллографических исследований служили природные многогранники. Математика, физика, химия – вот те основы, на которых базируется современная кристалло-

графия. Неуклонный рост потребности в новых композиционных материалах, приборо- и аппаратуростроения, оптической промышленности выдвигает множество кристаллографических задач первостепенной важности. К их числу относится задача получения высококачественного кристаллического материала, необходимого для развития новой техники. Искусственные алмазы, кварц, рубин, многочисленные полупроводники широко используются в промышленности, вместе с тем наукоемкость и технократизация общества требует новых кристаллических материалов, обладающих нужными свойствами. Для этого необходимо тщательное изучение процессов образования, роста и разрушения кристаллов, а также исследование кристаллических структур, геометрия которых обуславливает большинство их физических и химических особенностей.

## Конституция минералов

Основным внешним признаком минералов как природных образований является геометрическая форма их кристаллов, с которой мы постоянно сталкиваемся в повседневной жизни: кубические кристаллики поваренной соли, разнообразные кристаллы химических препаратов, снежинки, иней и т. д. Эта форма представляет естественный облик этих веществ и получается самопроизвольно в процессе их формирования. Когда из раствора или расплавленной массы вещество начинает переходить в твердое состояние, то при наличии соответствующих условий окружающей среды оно кристаллизуется, т. е. подвергается самоограничению, или, иначе говоря, принимает геометрический облик, который часто является характерным признаком для многих веществ, и они легко узнаются по внешнему кристаллическому виду или *габитусу*.

По *размерам* кристаллы весьма разнообразны; принято подразделять их на две группы: макрокристаллы и микрокристаллы. Макрокристаллы видны невооруженным глазом, для обнаружения микрокристаллов требуются увеличительные приборы: лупа или микроскоп.

*Форма* кристаллов зависит от их внутреннего строения. Хорошо известно, что мельчайшие частицы – атомы, ионы и молекулы, составляющие вещества, распределены в строго определенном порядке. Это распределение материальных частиц создает представление о так называемой пространственной или кристаллической решетке. Разными видами и формами таких решеток объясняется многообразие внешних геометрических форм кристаллов.

Итак, *кристаллом* называется твердое тело в форме многогранника, в котором материальные частицы расположены закономерно в виде пространственной решетки. Геометрическая форма кристаллов всегда

находится в прямой зависимости от их внутреннего строения и будет являться неизменной лишь в том случае, если не меняется внутренняя группировка атомов. С изменением внутренней структуры произойдет изменение внешней формы кристалла. Такое изменение может быть вызвано изменением термодинамической обстановки внешней среды.

*Пространственная решетка* (рис. 1) является скелетом всякого кристалла независимо от его внешней формы. В строении пространственной решетки выделены следующие элементы. Отдельные точки (частицы), слагающие пространственную решетку, называются *узлами*. *Ряды* – совокупность тождественных узлов, расположенных вдоль прямой, и повторяющихся через равные промежутки. Расстояние между двумя соседними узлами в пределах одного ряда называется *параметром* ряда. Параметры пространственной решетки очень малы и определяются особыми величинами  $A^{\circ}=10^{-8}$  см.

*Плоская сетка* – совокупность узлов, расположенных в одной плоскости, каждая плоская сетка разбивается двумя сериями плоских пересекающихся рядов на систему равных и параллельно ориентированных параллелограммов (ромбы, прямоугольники, квадраты). Расположение узлов на плоской сетке характеризуется тремя величинами: параметрами рядов  $a$ ,  $b$  и углом  $\alpha$  между этими рядами.

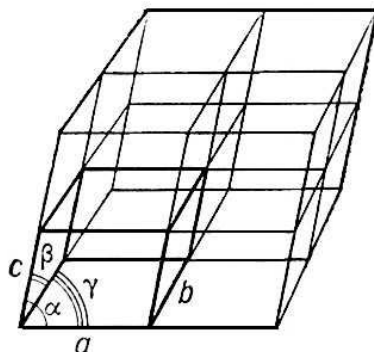


Рис. 1. Пространств решетка и ее элементы

*Элементарная ячейка* – элементарный параллелепипед, закономерная повторяемость которого образует пространственную решетку. Форма элементарного параллелепипеда характеризуется следующими величинами: отношением трех ребер и трех углов. Например: куб –  $a = b = c$ , углы =  $90^{\circ}$ , прямоугольный параллелепипед –  $a \neq b \neq c$ , углы =  $90^{\circ}$ , косугольный параллелепипед –  $a \neq b \neq c$  и углы не равны между собой и не равны  $90^{\circ}$ .

Связь внутреннего строения кристалла с внешней формой проявляется следующим образом: грани соответствуют плоским сеткам, ребра

кристаллов – рядам, наиболее плотно усаженных частицами, т. е. имеющих наибольшую ретикулярную плотность. *Ретикулярная плотность* – это число узлов, приходящихся на единицу площади плоской сетки или единицу длины ряда пространственной решетки.

Закономерное внутреннее строение кристаллов обуславливает три важнейших их свойства: однородность, анизотропность и способность самоограняться.

*Однородностью* называется способность тела во всем своем объеме обнаруживать одинаковые свойства. При этом не принимаются во внимание посторонние включения, загрязнения и несовершенства реальных кристаллов, связанные с внешними воздействиями.

*Анизотропность* – проявление неодинаковых свойств по непараллельным направлениям. Характерный пример резко выраженной анизотропности – слюда (расщепление по плоскостям параллельным пластинчатости). Другим примером анизотропности является минерал дистен  $Al_2O_3[SiO_4]$ , отличающийся резко различной твердостью по различным направлениям (по удлинению легко царапается ножом, а в перпендикулярном направлении нож не оставляет никаких следов).

*Способность самоограняться*, т. е. принимать многогранную форму в результате свободного роста в подходящей среде, свойственна только кристаллам. Выточенный из кристалла шарик с течением времени в подходящей среде покрывается гранями.

Следует отметить, твердые вещества находятся не только в кристаллическом состоянии. Существуют вещества, в которых частицы, слагающие их, находятся в менее правильном состоянии, нежели в кристаллах, но не так хаотично, как в газах. Такие вещества называются аморфными. «Аморфный» с греческого языка дословно переводится как «бесформенный». Такое название дается твердым веществам, которым не свойственна многогранная форма. Типичным примером является вулканическое стекло, природные смолы. При быстром остывании лавы частицы не успевают расположиться закономерно, и расплав застывает в виде аморфного вещества. С течением времени аморфные вещества перерождаются в кристаллические. В природе процесс идет несколько миллионов лет. Образование кристаллов зависит не только от скорости застывания расплава, но и от многих других условий, например от вязкости расплава. Более вязкие расплавы чаще застывают в виде стекол, а менее вязкие, т. е. более подвижные – в виде кристаллов. Весьма подвижны атомы металлов. Как бы быстро мы не охлаждали расплавленный металл, он всегда успевает закристаллизоваться. Аморфных твердых металлов не бывает.

Отличительное свойство аморфных тел – *изотропность, т. е. равносторонность*. Аморфное вещество имеет одинаковые свойства в различных своих направлениях, будь то теплопроводность, электропроводность, твердость и т. д. Кроме того, аморфные вещества способны адсорбировать извне множество химических элементов. Вследствие этого они часто отличаются колеблющимся в широких пределах химическим составом и физическими свойствами.

Некоторые радиоактивные минералы также не обладают четкой кристаллической структурой. Они изначально кристаллизовались как типично упорядоченные структуры, однако со временем кристаллическая структура почти полностью разрушилась в результате излучения радиоактивных компонентов – урана и тория. Такие минералы называют *метамиктными*. Внешнюю форму они, как правило, сохраняют, отсутствие же внутренней упорядоченности в расположении атомов проявляется в аномальных оптических свойствах (изотропность, когда следует ожидать анизотропии). При отжиге метамиктного минерала, т. е. при выдержке его в течение нескольких часов при высокой температуре, кристаллическая структура может восстановиться.

## Понятие о симметрии

Формы природных кристаллов с древнейших времен поражали глаз своей симметричностью. По выражению великого русского кристаллографа Е.С. Федорова, фигуры кристаллов «блещут своей симметрией». В качестве примера вспомним очертания снежинки, или изумительно правильные восьмигранники (октаэдры) драгоценных алмазов. «Симметрия» в переводе с греческого языка означает «соразмерность». Фигура называется симметричной, если она состоит из равных, закономерно повторяющихся частей. Применительно к кристаллам понимается повторяемость их одинаковых граней, ребер, вершин, относительно некоторых воображаемых геометрических элементов (прямая линия, плоскость, центр). Эти воображаемые или вспомогательные геометрические элементы, с помощью которых обнаруживается симметрия кристалла, называются *элементами симметрии*.

К элементам симметрии кристалла относятся ось симметрии *L*, плоскость симметрии *P* и центр симметрии *C* (рис. 2).

*Ось симметрии* – это прямая линия, при повороте вокруг которой на  $360^\circ$  кристалл несколько раз совмещается со своим исходным положением. Число совмещений кристалла со своим исходным положением при повороте на  $360^\circ$  называется *порядком оси симметрии*. В кристалле возможны оси симметрии 1, 2, 3, 4 и 6 порядков. *Оси 5 порядка и выше*

б невозможны исходя из строения пространственной решетки кристалла. В кристалле могут быть только такие оси симметрии, которые не противоречат симметрии и свойствам самой пространственной решетки. Оси симметрии в кристалле могут выходить в центре граней, в середине ребер и в вершинах многогранных углов.

*Плоскость симметрии* – плоскость, которая делит кристалл на две зеркально равные части.

Плоскости симметрии проходят перпендикулярно граням и ребрам (в их середине) и вдоль ребер. В некоторых кристаллах плоскости симметрии отсутствуют. Плоскостей в кристалле может быть 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9. *Восемь и более чем девять плоскостей в кристалле быть не может.*

*Центр симметрии* – это точка внутри кристалла, в которой пересекаются и делятся пополам линии, соединяющие противоположные, одинаковые грани, ребра или вершины кристалла. Следует заметить, что центр симметрии не следует отождествлять с центром тяжести. Центр тяжести в кристалле, как и в любом физическом теле, присутствует всегда, тогда как центр симметрии характерен для кристаллов совершенной симметрии. Например, в пирамидах центр симметрии отсутствует.

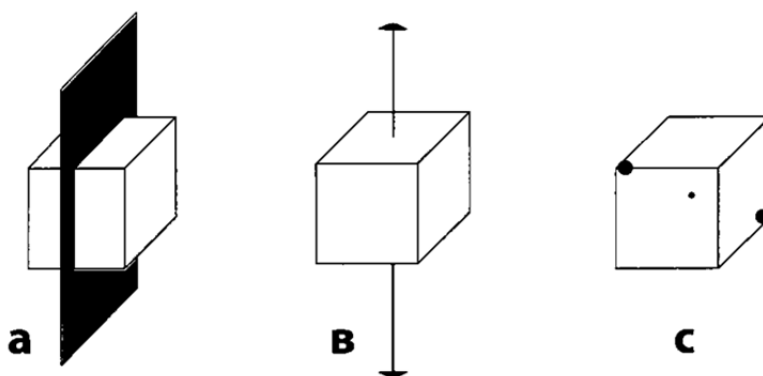


Рис. 2. Элементы симметрии: а – плоскость (а); б – ось; с – центр

Любой кристалл обладает определенным набором элементов симметрии. Все разнообразие возможных сочетаний элементов симметрии укладывается в 32 вида симметрии.

Виды симметрии по набору сходных элементов симметрии и одним числом единичных направлений объединяются в более крупные группы, называемые *сингониями*. Дословно переводится как сходноугольность (по гречески «син» – сходный, «гонио» – угол).

Различают следующие сингонии:

- Триклинная («клино» – наклон). Характеризуется наклоном кристаллографических осей в трех направлениях. Не обнаруживает элементов симметрии или присутствует только центр симметрии С. Все



направления единичные. *Единичным называется единственное не повторяющееся в кристалле направление*

- Моноклинная. Характеризуется наклоном одной кристаллографической оси. В кристаллах присутствует не более одной плоскости симметрии или не более одной оси 2-го порядка, при отсутствии осей выше 2-го порядка. Единичных направлений множество.

- Ромбическая. В поперечном сечении кристалла почти всегда обнаруживается ромб. Присутствует более одной оси 2-го порядка или более одной плоскости симметрии, при отсутствии осей симметрии выше 2-го порядка. Три единичных направления, совпадающих с осями 2-го порядка.

- Тригональная. Поперечное сечение кристалла – треугольник. В кристаллах обязательно присутствует ось симметрии 3-го порядка. Единичное направление совпадает с осью 3-го порядка.

- Тетрагональная. Поперечное сечение квадрат. Обязательно наличие оси 4-го порядка, с которой совпадает присутствие одного единичного направления.

- Гексагональная. В сечении шестиугольник (гексагон). Обязательно присутствие одной оси 6-го порядка, с которой совпадает единственное единичное направление.

- Кубическая. Обязательно присутствие четырех осей 3-го порядка. Единичных направлений нет.

В свою очередь сингонии объединяются в *категории*: низшая, средняя, высшая.

*Низшая* категория включает триклинную, моноклинную, ромбическую сингонии. Характеризуется наличием нескольких единичных направлений (не менее трех) и отсутствием осей выше 2-го порядка. Все кристаллы, относящиеся к низшей категории, имеют уплощенный облик.

*Средняя* категория объединяет тригональную, тетрагональную, гексагональную сингонии. Особенность – наличие только одного единичного направления в кристаллах, с которым совпадает единственная ось симметрии выше 2-го порядка ( $L_3 L_4 L_6$ ). Кристаллы характеризуются вытянутостью в одном направлении, т. е. призматическим, пирамидальным, столбчатым обликом.

*Высшая* категория – кубическая сингония. Единичные направления в кристаллах отсутствуют. Присутствуют несколько осей симметрии выше 2-го порядка. Кристаллы характеризуются изометричностью.

*Формы кристаллов.* При описании кристаллов недостаточно ограничиваться одними элементами симметрии, необходимо принимать во внимание габитус (внешний вид). По внешнему ограничению кристаллы делятся на две группы.

К первой группе относятся кристаллы, которые при своем идеальном развитии состоят из одинаковых и симметрично расположенных граней. Например: куб, октаэдр, тетраэдр и др. Такие многогранники представляют из себя *простые формы*.

Модель в форме кирпичика или спичечной коробки имеет грани трех видов в виде парных прямоугольников разного размера. Такие многогранники представляют собой *комбинацию* простых форм (рис. 3). Итак, комбинацией называется совокупность двух или нескольких простых форм. Различные по виду грани всегда принадлежат различным простым формам. Примером простой комбинации служит шестигранная пирамида. Шесть треугольных граней, представляют одну простую форму, грань основания в виде гексагона представляет другую простую форму именуемую моноэдром.

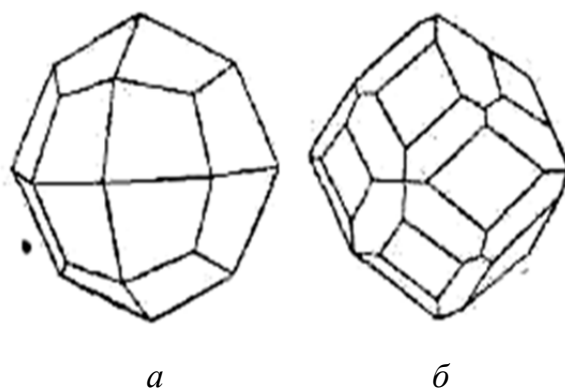


Рис. 3. Простая форма тетрагонтриоктаэдр (а), в комбинации с ромбододекаэдром (б)

В кристаллографии имеем всего 47 типов простых форм (Приложение). Комбинаций же возможно бесконечное количество.

Кроме того, среди простых форм различают *открытые* и *закрытые*. К закрытым относятся простые формы, замыкающие пространство своими гранями, например: куб, октаэдр, тетраэдр. Открытые формы сами по себе не замыкают пространство, как, например, призма или пирамида и могут существовать только в комбинации с другими простыми формами. *Энантиоморфные формы*. «Энантиос» – противоположный (греч.). Это противоположно-равные формы. В природе встречаются кристаллы, тождественные по числу и форме граней, одинаковые по названию, которые относятся друг к другу как предмет и его зеркальное отражение. Соответственно среди них различают правые и левые формы (рис. 4).

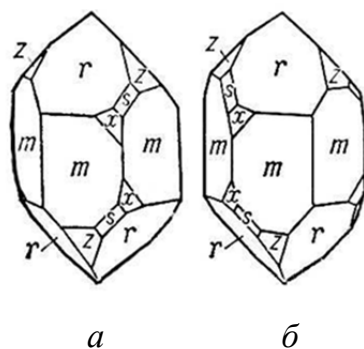


Рис. 4. Правая (а) и левая (б) формы кристаллов кварца

**Номенклатура простых форм.** В основу названия простых форм положено несколько признаков: число граней, форма грани и вид самой формы. Исторически в кристаллографической номенклатуре используются греческие термины:

моно-, ди (би-), тетра-, пента-, гекса-, окта-, додека-, эдра-, гонио, син (сходно), пинакос (таблица, доска), клине (наклон), поли, скаленос (косой, неровный).

### Формы природных кристаллов

Переходя непосредственно к формам реальных кристаллов, отметим некоторые термины, широко используемые в минералогии и петрографии при описании кристаллов.

Кристалл называется *идиоморфным*, если он огранен собственными ему и достаточно хорошо развившимися гранями (рис. 5). Кристалл, не имеющий четких граней называется *ксеноморфным* (например, зерна неправильной формы во многих породах) рис. 6.



Рис. 5. Идиоморфные кристаллы: а – галит; б – кварц

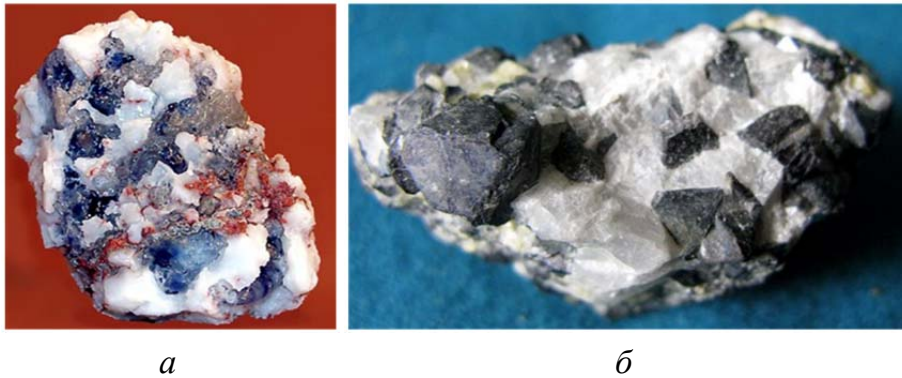


Рис. 6. Ксеноморфные кристаллы: а – галит; б – кварц, магнетит

Реальные кристаллы иногда далеки от идеализированных многогранников. При внимательном просмотре на их поверхности всегда обнаруживаются следы имевших место процессов роста или растворения в виде бугорков, наростов, ямок, штрихов и т. п. Подобные усложнения на поверхности граней принято называть *скульптурой граней* (рис. 7). Изучение таких скульптур дает ценнейший материал, объясняющий многие особенности строения, роста и преобразований кристаллов.

При сильных отклонениях от условий нормальной кристаллизации, например, в вязких и загрязненных средах, в связи с неравномерным поступлением вещества к различным частям кристалла возникают усложненные фигуры роста, так называемые *скелеты*. Само слово указывает на то, что мы имеем как бы остов кристалла (рис. 8). В результате резкой разницы скоростей роста по различным направлениям кристалла вещество заполняет не все тело многогранника, а только его часть.

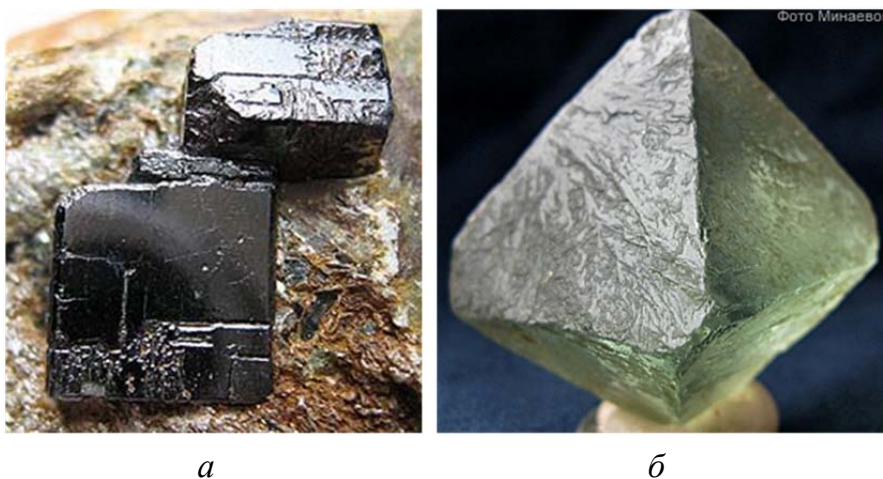


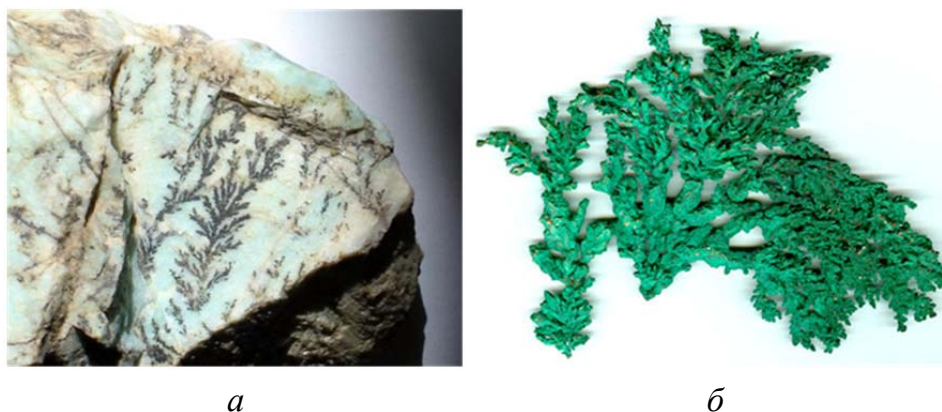
Рис. 7. Скульптура граней кристаллов галенита (а) и флюорита (б)

При этом в самых выгодных условиях оказываются наиболее выступающие части кристалла – его вершины и ребра. По ним и происходит ускоренный рост, тогда как грани отстают в своем развитии. Классический пример – снежинки. Они преимущественно состоят из форм, образованных нарастанием вершин и ребер.



*Рис. 8. Скелетные кристаллы галенита (а); граната (б)*

Скопления скелетных образований, напоминающие древовидные, моховидные и тому подобные формы, называются *дендритами* (рис. 9). В виде дендритов нередко кристаллизуются самородное золото, серебро, медь. Характерным примером дендритов служат ледяные узоры на стеклах.



*Рис. 9. Дендриты псиломелана (а) на амазоните; малахита по самородной меди (б)*

До сих пор мы говорили об отдельных кристаллах. Однако в природе гораздо чаще образуются не отдельные кристаллы, а кристаллические сростки. С точки зрения ориентировки кристаллов, различают *сростки незакономерные, приближенно закономерные и закономерные*.

К незакономерным сросткам принадлежат агрегаты различно ориентированных кристаллических зерен, в которых не наблюдается никаких явных закономерностей (минеральные агрегаты породообразующих ассоциаций) (рис. 10).

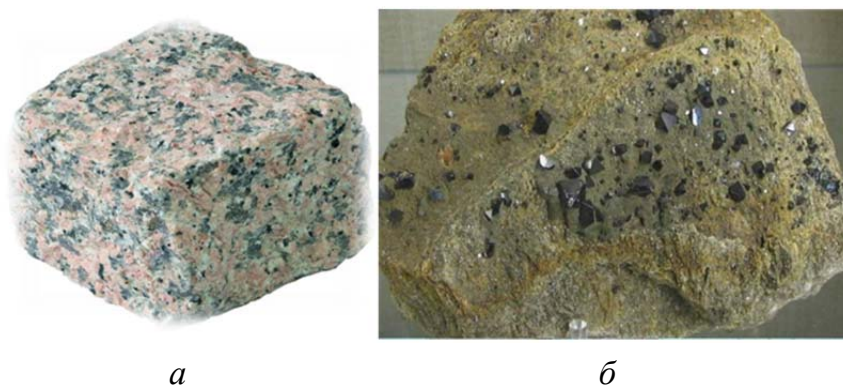


Рис. 10. Незакономерные сростания полевых шпатов с кварцем и слюдой (а); оливина с магнетитом (б)

В случае приближенно закономерных сростков наблюдается уже некоторая упорядоченность в расположении, ориентировке отдельных кристаллов (плоскостные сростки, друзы кристаллов различных минералов) (рис. 11).

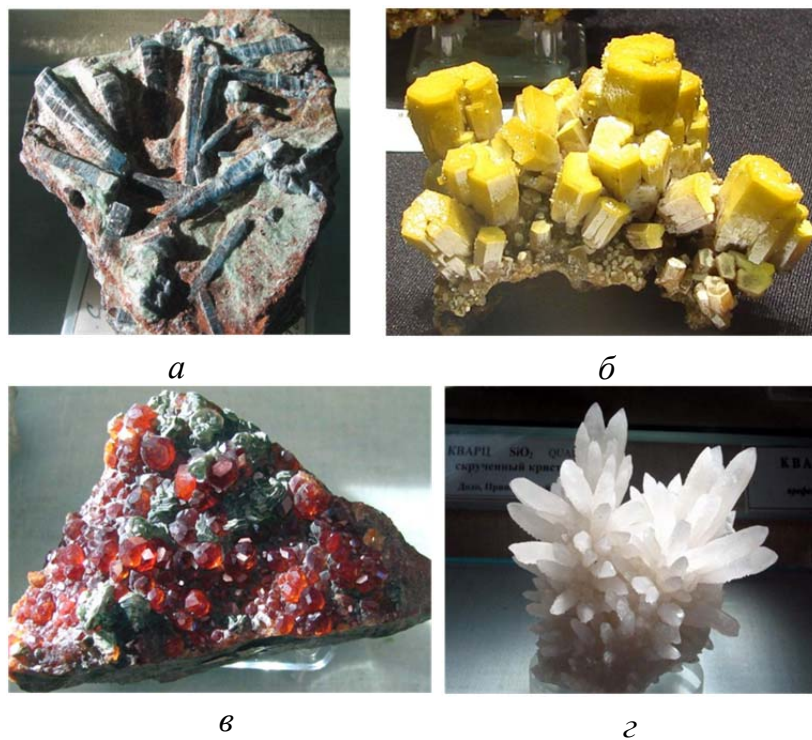
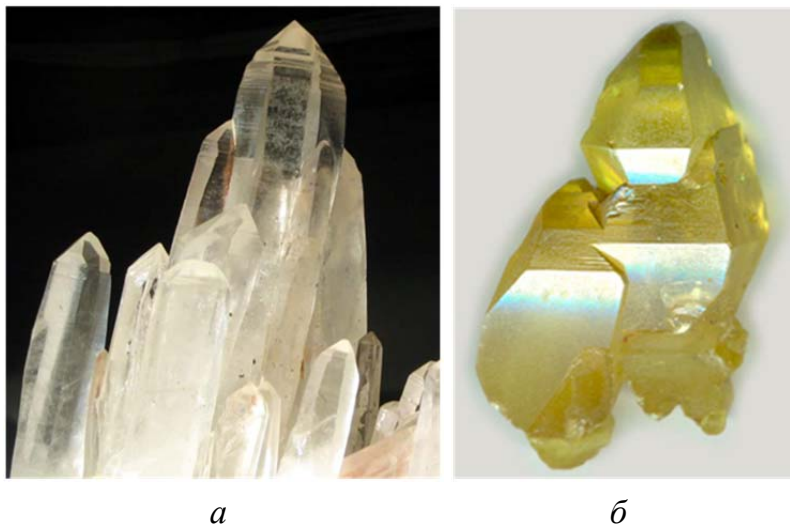


Рис. 11. Приближенно закономерные сростки: а – дистен; б – пироморфит; в – гранат; z – кварц

Собственно закономерные сростки – это параллельные сростки (рис. 12) и двойники. Первые соответствуют нескольким однородным кристаллам, сросшимся в параллельной относительно друг друга ориентировке.

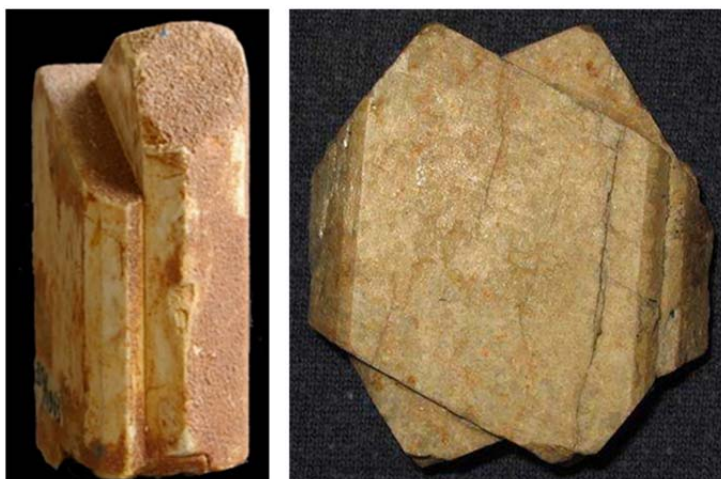


*Рис. 12. Параллельные сростки кристаллов кварца (а); кальцита (б)*

Двойники явление более сложное. Двойники – это закономерные сростки однородных кристаллов, в которых один кристалл выводится из другого путем поворота на  $180^\circ$  или же один кристалл является зеркальным отражением другого (рис. 13, 14). Для двойников характерны входящие углы. Прямая, при повороте вокруг которой на  $180^\circ$  из одного индивида двойника выводится другой называется двойниковой осью. Плоскость, при отражении в которой из одного индивида двойника выводится другой, называется двойниковой плоскостью.

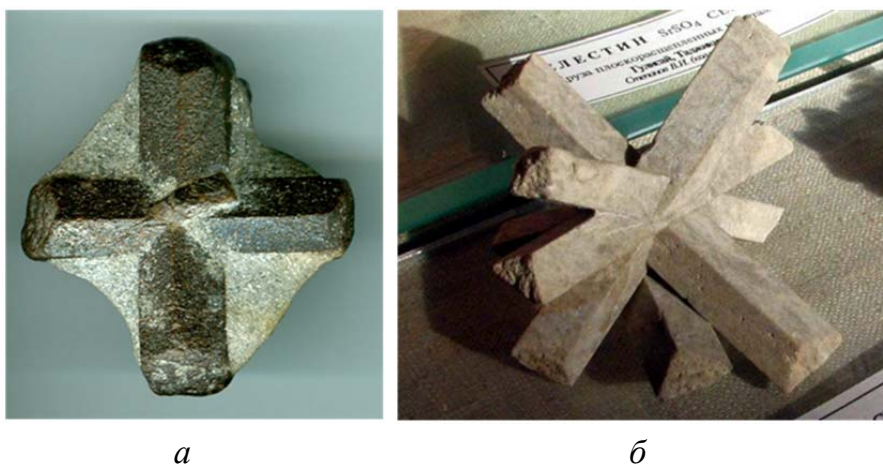


*Рис. 13. Двойники отражения: а – кварц; б – гипс*



*Рис. 14. Поворотные двойники ортоклаза*

В зависимости от характера срастания различают двойники срастания и прорастания. В двойниках срастания индивиды ограничены плоскостями, а в двойниках прорастания один кристалл как бы прорастает другой (ставролит).



*а*

*б*

*Рис. 15. Двойник прорастания ставролита (а); четверник прорастания целестина (б)*

В случае срастания по двойниковым законам трех, четырех и более кристаллов, различаем соответственно тройники, четверники и т.д, так называемые сложные кристаллы.

В некоторых случаях встречаются сростки, в которых соседние кристаллы ориентируются относительно друг друга в двойниковом положении, а кристаллы, следующие через один, являются взаимно параллельными. Это так называемые полисинтетические двойники. Они особенно характерны для полевых шпатов (рис. 16) и кальцита.



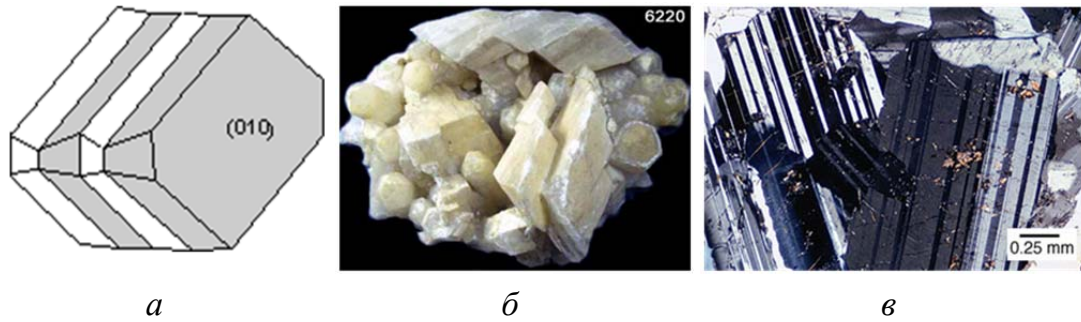


Рис. 16. Полисинтетическое двойникование альбита: а – схема срастания; б – природные сростки; в – вид в шлифе в проходящем свете

До сих пор рассматривались срастания кристаллов одного и того же вещества. Вместе с тем известны многочисленные случаи закономерных срастаний кристаллов различных веществ. Структурно закономерное срастание кристаллов различных веществ называется эпитаксией. Такие сростки характерны для полевых шпатов и кварца («письменный гранит»), микроклина и альбита (пертиты) (рис. 17).



Рис. 17. Письменный гранит (а), пертит (б)

## Роль, место, объект исследования минералогии

Дмитрий Павлович Григорьев (1909–2003) – профессор ЛГУ, минералог, проследил иерархические взаимосвязи наук геологического цикла с уровнем организации природного вещества, выразившиеся в простой последовательности от малого к глобальному:

*объект исследования:*

атом – минерал – порода – месторождение – земная кора,

*науки:*

геохимия – минералогия – петрография – геология месторождений полезных ископаемых – геология.

Объектом исследования минералогии является минерал, что в переводе с латинского означает штуф, руда (*minera*). Считается, что впервые термин «минералогия» был предложен итальянским ученым Бернардо Цезием в 1636 г. Однако широко использоваться он стал, начиная с середины XVIII в.

Тем не менее, минералогия как наука зародилась на заре человечества и до того, как она получила название, имела богатую историю.

При тысячелетнем существовании науки минералогии строгое определение понятия «минерал» было сделано лишь во второй половине XX века на Международном минералогическом конгрессе:

«Минерал – это химически и физически индивидуализированный неорганический продукт природной физико-химической реакции, находящийся в кристаллическом состоянии или бывший в кристаллическом состоянии и утративший его в результате метамиктного распада».

В более простой формулировке «минерал» – это природное химическое соединение, определенной кристаллической структуры, обладающее определенным набором физических и химических свойств, возникшее в определенном геологическом процессе.

При строгом подходе минералом не может называться кристаллическое химическое соединение, полученное в лаборатории искусственным путем, даже если оно полностью соответствует по составу и структуре природному минералу. Все некристаллические и аморфные вещества природного органического и неорганического происхождения принято называть «минералоиды» (рис. 18). К ним относятся битумы, газы, природные стекла, биогенные минералы (янтарь, жемчуг), аморфные продукты изменения горных пород и минералов (опал, гидрогетит), разного рода рассолы, ртуть. До сих пор не прекращаются дискуссии по поводу того, относить ли к числу минералов органические кристаллические соединения и неорганические соединения, возникшие в результате техногенных процессов (горения угольных терриконов или золоотвалов).

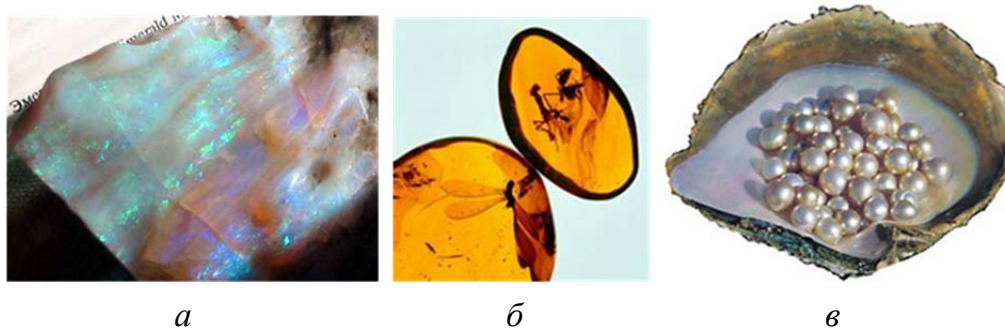


Рис. 18. Минералоиды: а – опал; б – янтарь; в – жемчуг

Минералогия изучает состав, строение и свойства минералов, условия их образования, изменения и исчезновения или превращения. В научной литературе чаще используется более емкое понятие «минеральный вид». Это термин исключительно отечественного пользования неизвестный для зарубежной научной литературы. Он введен в 1926 г. А.К. Болдыревым, дополнен и расширен трудами В.С. Соболева и А.А. Годовикова. Согласно Годовикову, минеральный вид – это совокупность минералов одинаковой структуры, состав которых может непрерывно изменяться в пределах ограничивающихся изменениями структуры либо в условно принятых границах. Природные соединения одного и того же состава, но разной структуры будут относиться к разным минеральным видам (алмаз-графит, арагонит-кальцит).

В пределах обозначенного нами минерального вида могут выделяться *разновидности*. Это делается для того, чтобы подчеркнуть некоторые особенности состава и структуры минерала, не выходящие за рамки минерального вида, но отражающиеся на физических свойствах минерала. Чаще всего это разновидности по химическому составу (фаялит-оливин-форстерит), цвету (сфалерит-клейофан-марматит), агрегатному состоянию (пар-вода-лед).

*Минеральный индивид* (по Д.П. Григорьеву) – это образовавшееся в природе твердое обособление однородного химического вещества (зерно минерала), отделенное от других обособлений того же состава физическими поверхностями раздела. Минеральными индивидами являются кристаллы и зерна минералов. Другими словами, *минеральный индивид* – это кристаллическое неделимое любой формы и размера. Размеры минеральных индивидов определяются условиями образования и могут меняться от микроскопических до гигантокристаллических. В практической деятельности всегда приходится иметь дело с минеральными индивидами. Изучение формы индивидов, их внутреннего строения, взаимоотношений друг с другом позволяет восстановить условия образования минерала. Количество минеральных индивидов бесконечно велико. Количество же минеральных видов ограничено и в настоящее время известно более 4 тысяч (сравните: растения – 500 тысяч, животные – 1,5 млн., синтезированных неорганических веществ – свыше 500 тысяч и т. д.).

В настоящее время известно свыше 90 устойчивых химических элементов, способных образовывать собственные минералы. Расчеты показывают, что число сочетаний этих элементов, а, следовательно, и число потенциальных минералов, превосходит число имеющихся, по крайней мере, в 100 раз. Причина ограниченности числа минеральных видов связана с проявлением законов геохимии и термодинамики в пределах земной коры. В природных процессах несоизмеримо ограничены

пределы таких параметров как температура и давление, следовательно, для ряда химических элементов не создаются подходящие условия для их соединения. К тому же химические элементы в пределах земной коры распределены крайне неравномерно. Самыми распространенными являются: О – 47 %, Si – 29,5 %, Al – 8,05 %, Fe – 4,65 %, Ca – 2,96 %, Na – 2,5 %, K – 2,5 %, Mg – 1,87 %, на их долю приходится 99 % общего количества атомов. В основном этими элементами сложены основные породообразующие минералы силикатного и алюмосиликатного состава. Поэтому перечисленные элементы называются петрогенными. Поскольку внешние оболочки Земли наиболее богаты кислородом и водородом, а давление и температура менее изменчивы, чем на глубоких горизонтах, именно поверхностные или экзогенные минеральные системы отличаются наибольшим разнообразием химического состава.

### Основные этапы развития минералогии

Некоторые из минералов и горных пород люди научились тщательно отбирать для тех или иных целей задолго до появления письменности. Объектом такого доисторического использования были красные и черные минеральные пигменты (гематит, пиролюзит и некоторые другие оксиды марганца и железа), которыми пользовались мастера пещерной живописи. Твердым и вязким (крепким) минералам и породам (кремнь, нефрит, обсидиан и др.) придавали форму режущих инструментов или оружия (рис. 19). Добыча и плавление руд для получения золота, серебра, железа, меди также начались значительно раньше появления первых известных нам письменных источников.

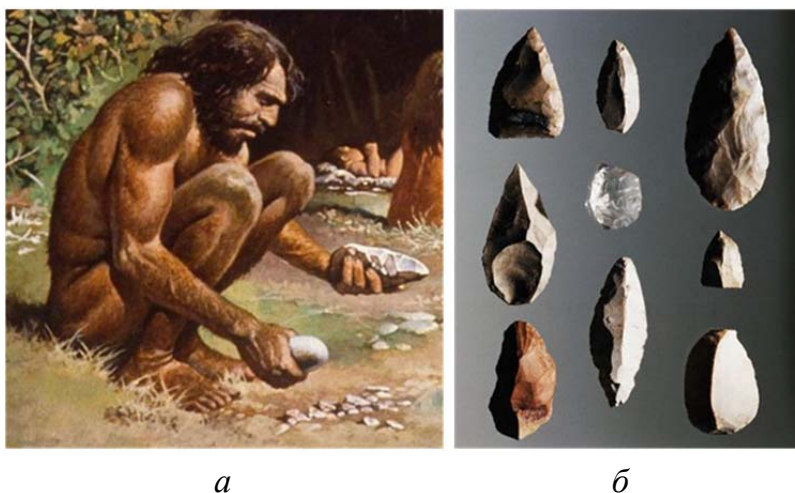


Рис. 19. Первый опыт практической минералогии (а); орудия труда (б)

Аристотель (348–322 гг. до н. э.) счел необходимым включить раздел о камнях в свою широко известную «Метеорологию». Его ученик Теофраст (372–287), сменивший Аристотеля в качестве главы Лицея в Афинах, написал первый в истории трактат, посвященный исключительно веществам минерального царства. Этот труд, который иногда называют «первой книгой по минералогии», получил название «О камнях».

Следующий заметный вклад в описательную минералогия был сделан Плинием Старшим (23–79 гг. н. э.), изложившим большую часть вопросов естествознания так, как их представляли в Древнем Риме. Из 37 томов его энциклопедического труда «Естественная история» пять посвящены минералам, добывавшимся для использования в качестве драгоценных камней, красок или руд различных металлов.

Успехи, достигнутые в последующие 1500 лет, описаны в трудах немецкого естествоиспытателя горного советника Георга Бауера (1494–1555), более известного под именем Георга Агриколы. Особый интерес представляют две работы этого исследователя «О природе полезных ископаемых» 1546 г. и «О рудах металлов» 1556 г. Они характеризуют состояние минералогии, геологии, горного дела и металлургии в ту эпоху и снабжены прекрасно выполненными гравюрами на дереве. Абраам Готлоб Вернер как и другие историки науки называет Агриколу «отцом минералогии».

Следующая веха в развитии минералогии связана с работами датского ученого Нильса Стенсена, известного также под именем Николы Стенона. Открытие им в 1669 г. закона постоянства гранных углов кристаллов легло в основу развития кристаллографической науки.

XVIII в. характеризовался медленным, но непрерывным развитием минералогии. Было открыто и описано много минералов и предпринято несколько попыток их рациональной классификации. В начале 19 в. общая до того времени наука о камнях и других ископаемых разделяется на минералогия, горнорудное дело, металлургия, геология и палеонтологию, что произошло благодаря трудам А.Г. Вернера, преподавателя Фрайбергской Горной академии, бывшей в то время основным центром развития минералогии. Список известных в то время минералов насчитывал около 300 видов. Число изученных минералов стало быстро расти, когда начали применять химический анализ. Большой вклад в изучение состава минералов и форм их кристаллов внесли выдающиеся ученые XVIII–XIX вв. Ян Берцелиус, Аксель Кронштедт, Михаил Васильевич Ломоносов, Василий Михайлович Севергин, Николай Иванович Кокшаров, Юхан Гадолин, Павел Владимирович Еремеев, Рене Жюст Гаюи, Лавуазье, Мишель Леви и многие другие. Темпы развития науки резко возросли на рубеже XIX–XX вв. На первый план выступило кристалло-

графическое исследование минералов. И оптические методы заняли важнейшее место в минералогических исследованиях, хотя микроскоп использовался для изучения минералов с начала 19 в.

В конце XIX – начале XX в. ученым удалось проникнуть в тайну кристаллической структуры минералов. В 1890 г. русский ученый Евграф Степанович Федоров теоретически установил все 230 возможных способов расположения атомов в кристаллах, а в 1912 г. немецкий физик Макс Теодор Лауэ предложил использовать открытые в 1895 г. рентгеновские лучи для исследования кристаллов. Именно тогда появились новые науки, связанные с минералогией: кристаллохимия, кристаллофизика, геохимия.

Более поздние этапы развития минералогии характеризуются широким использованием электронных микроанализаторов и постоянно возрастающим применением других сложных приборов и методов (мессбауэровская и инфракрасная спектроскопия и др.), в задачу которых входит определение тех или иных характеристик минералов и кристаллических веществ.

В настоящее время, как уже было сказано, список известных минералов насчитывает свыше 4 тыс. видов и ежегодно открываются десятки новых.

Современная минералогия характеризуется многообразием интересов и подходов к изучению минерального вещества. К настоящему времени выделились и существуют вполне самостоятельно следующие направления минералогии:

1. Кристаллографическая минералогия изучает идеальные и реальные формы кристаллов, а также причины проявления в кристаллах наблюдаемой огранки.
2. Физика минералов исследует физические свойства минералов и их природу.
3. Химическая минералогия – химический состав минералов и его особенности.
4. Генетическая минералогия – вопросы генезиса или происхождения минералов.
5. Топоминералогия изучает закономерности образования и распределения минералов в пределах отдельных геологических объектов (месторождений, рудных тел, а также географических провинций).
6. Поисковая минералогия занимается разработкой минералогических методов поисков и оценки месторождений полезных ископаемых.
7. Технологическая минералогия занимается вопросами, связанными с совершенствованием способов получения полезных компонентов руд.
8. Биоминералогия изучает биоминералы и неорганические продукты жизнедеятельности биологических объектов.

9. Онтогения – учение о зарождении, росте и изменении минеральных индивидов (история жизни минералов)
10. Термобарометрия исследует параметры минералообразования путем изучения включений минералообразующей среды, захваченных и законсервированных в растущем кристалле.
11. Экспериментальная минералогия занимается моделированием природных процессов минералообразования.
12. Синтез минералов – направление, разрабатывающее способы получения аналогов природных минералов с заданными свойствами в лабораторных условиях.
13. Геммология – наука о драгоценных камнях и синтетических материалах, имитирующих ювелирные и поделочные камни.
14. Космическая минералогия изучает внеземные минералы.
15. Минералогическое материаловедение изучает возможность применения различных минеральных добавок для создания современных композиционных материалов.
16. Техническая минералогия изучает неорганические техногенные продукты (шламы, шлаки, отвалы).
17. Экологическая и радиационная минералогия изучает вредное воздействие некоторых минералов на человека и разрабатывает методы ограничения этого воздействия.
18. Медицинская минералогия рассматривает положительное влияние минералов на человека.

### **Значение минералогии**

Наше индустриальное общество использует огромные количества минералов и продуктов на их основе, без постоянного и значительного притока которых нам вряд ли удалось поддерживать привычный образ жизни. Вообще говоря, практически все, что мы используем, тесно связано с минералами.

Иногда минерал употребляется нами в виде, близком к природному, благодаря каким-либо специфическим и ценным свойствам, например, каменная соль. Алмаз высоко ценится за красоту и в то же время используется для резки камня и металлов благодаря исключительной его твердости. Разнообразные глинистые минералы имеют широкое применение благодаря их пластичности и абсорбционным свойствам. Специфичное теплосопrotивление определяет использование некоторых видов слюд и т. д.

В других случаях минерал может не представлять самостоятельной ценности, но содержать крайне важные химические компоненты. Так

халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ) почти на 34 % состоит из меди и добывается с целью извлечения этого ценного металла. Гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) иногда используется для получения железа, а иногда как красный краситель.

Вряд ли можно найти хотя бы один аспект нашей жизни, не зависящий полностью от регулярного снабжения различными минералами. Выращивание сельскохозяйственных растений в огромной мере зависит от содержания фосфорных и калийных удобрений, металлоорганических пестицидов; уборка урожая производится с помощью сложных механизмов, работающих на природном органическом топливе. Для перевозки урожая с места сбора необходимы шоссейные и железные дороги, машины, корабли, рефрижераторы и т. д. Еду обычно готовят в металлической, стеклянной керамической посуде, на металлических и стекло-керамических плитах, а едят из фарфоровых тарелок. Без минералов мы не имели бы ни зданий, ни машин, не могли бы наслаждаться таким хобби как фотография или чтение книг, а в качестве валюты у нас были бы кокосы. Транспорт бы оставался примитивным, а связь на дальние расстояния осуществлялась бы с помощью дымовых сигналов.

Суммарное количество минералов добываемых и потребляемых в данной стране служит отличной мерой ее процветания. Большинство развитых стран (США, Великобритания и др.) является основным производителем и потребителем минералов. Развивающиеся страны (Чили Мексика и др.) в основном производят минеральное сырье, однако их собственное потребление минералов умеренно, в то время как в мало-развитых странах (Нигер или Малави) как производство, так и потребление минералов очень ограничено.

Необходимо сказать, что некоторые хорошо известные с давних времен минералы получили новое применение. Например, циркон ( $\text{ZrSiO}_4$ ) давно ценился как полудрагоценный ювелирный камень, сегодня его используют для получения высокотемпературных преломляющих материалов на основе диоксида циркония ( $\text{ZrO}_2$ ). Он также ценится как источник гафния, используемого в ядерных реакторах. Новые требования и развитие новых технологий пробуждают интерес к давно известным минералам. Например, колумбит  $(\text{Fe, Mg})(\text{Nb, Ta})_2\text{O}_6$  который до недавнего времени считался непродуктивным компонентом многих оловодержащих месторождений, сейчас добывается как источник ниобия, используемого в нержавеющей сталях и сверхпроводящих сплавах.

Крайне редко минерал со временем теряет свою коммерческую ценность. Это бывает в случае, когда его функции переходят к другому материалу или утрачивают свое значение. Так, в одно время битуминозные сланцы служили основным источником нефти, в наше время они полностью вытеснены натуральной жидкой нефтью. Кремень перестал исполь-



зоваться для изготовления каменных топоров и наконечников для стрел, и вряд ли когда-нибудь будет вновь использоваться для этих целей.

Для того чтобы получить необходимые количества минерального сырья, мировая добывающая промышленность должна ежегодно извлекать из недр не менее 100 миллиардов т. сырой породы, и эта цифра все возрастает. Такое возрастание добычи природных компонентов необходимо для удовлетворения растущих потребностей общества в различных материальных ценностях. В год на одного жителя Земли приходится в среднем более 5 т добываемой породы, тогда как в развитых странах этот показатель достигает 50 т на человека.

*Несколько слов о минералогических музеях.* Они являются национальными хранилищами уникальной, часто невозполнимо утрачиваемой минералогической информации. По этой причине значение их неопределимо велико как для отдельных стран, так и для человечества в целом.

Все крупные минералогические музеи выросли из частных коллекций. Так минералогическое собрание Британского музея (естественной истории) возникло в 1753 г. из коллекции лейб – медика Г. Слоуна и в дальнейшем пополнилось коллекциями Гатчета, Гревилла, Аллана, Рассела и др. Минералогический музей им. Ферсмана в Москве в разное время принял коллекции Петра I, Шишковского, Редикорцева, Крыжановского, Кочубея и многих других знатоков и любителей камня. Описание частных коллекций было важной формой работы минералогов, в том числе таких крупных как Роме де Лиль и И.Борн. Частные коллекции внесли основной вклад в минералогию первого периода – периода накопления знаний, на них отрабатывались принципы систематики минералов, каталоги коллекций – прообразы нынешних курсов описательной минералогии. В эпоху русского просвещения в России зародились дворцовые музеи. Коллекционирование камня и знание минералогии были модны и престижны. На слуху были имена коллекционеров – аристократов – князя В.А. Голицина (1738–1803), графа А.Г. Строганова (1795–1891), А.К. Разумовского (1758–1837). Не брезговала камнерезным искусством и Екатерина Великая, имевшая великолепную коллекцию гемм. Со второй половины XIX века в коллекционерское движение входит мощный поток «разночинной» интеллигенции. Повсеместно возникают краевые музеи естествознания, где важное место занимают минералы. В СССР довоенных лет коллекционирование шло под знаком практических нужд и в большей степени касалось полезных ископаемых, чем собственно минералов. Тем не менее, и тогда можно было купить в магазине недорогую коллекцию маленьких образцов, дававшую школьнику наглядное представление о минералах и кристаллах.

Важнейшая историческая заслуга коллекционеров прошлых лет – их неоценимый вклад в музейное дело.

*Крупнейшие национальные музеи России:*

- Музей им. А.Е. Ферсмана АН России (Москва) – 155 000 обр.
- Геологический музей Горной академии Санкт-Петербурга – 63 500 обр.
- Музей им В.И. Вернадского (Москва)
- Музей земледелия МГУ (Москва) – 58 359 обр.
- Минералогический музей Томского политехнического университета (рис. 20) – один из старейших музеев Сибири, являясь вузовским насчитывает свыше 16 000 обр.

*Зарубежные музеи:*

- Национальный музей естественной истории Смитсоновского института в США – 4 115 000 обр.
- Американский музей естественной истории в Нью-Йорке – 104 500 обр.

В настоящее время число любителей камня неуклонно растет. Во многих странах проводятся ежегодные минералогические ярмарки камнецветного и коллекционного сырья. Во многих городах существуют магазины и отделы, специализирующиеся на продаже минералов, окаменелостей и каменной сувенирной продукции.



*Рис. 20. Минералогический музей в 1 корпусе ТПУ*

## Химические свойства минералов. Формулы

Основная масса встречающихся в природе минералов это химические соединения, состав которых определяется комплексом входящих в него химических элементов. Не все элементы равноценны. Кремний присутствует в составе более 600 минералов, другие (индий, галлий, германий) образуют единичные минералы, а рубидий и гафний не образуют минералов вообще.

Очень важную роль в химическом составе минералов играют металлогенные элементы. Некоторые из них, пользующиеся широким распространением в земной коре, образуют повышенные концентрации в месторождениях полезных ископаемых (алюминий, железо). Большая же часть металлов находится в земной коре в сотых и тысячных долях процента (золото, серебро, олово, вольфрам, молибден). Характерно и то, что одни металлы встречаются в земной коре в виде кислородных соединений, такое сродство обнаруживают олово, вольфрам, хром, титан, торий, уран и некоторые другие элементы. Другие же встречаются в виде сернистых, сурьмянистых и мышьяковистых соединений. К ним относятся медь, цинк, ртуть, свинец, молибден, висмут и некоторые другие. Железо обнаруживает сродство и с кислородом и с серой. Самородными являются золото, серебро, платина, осмий, иридий, медь.

О химическом составе минерала судят по результатам полного химического анализа. Состав минерала изображается в виде химических формул: эмпирических и структурных (рис. 21).

*Эмпирические* формулы показывают элементы, входящие в состав минералов, их количественное отношение и отчасти природу химических соединений. *Структурные формулы* показывают связь отдельных элементов данного соединения между собой.

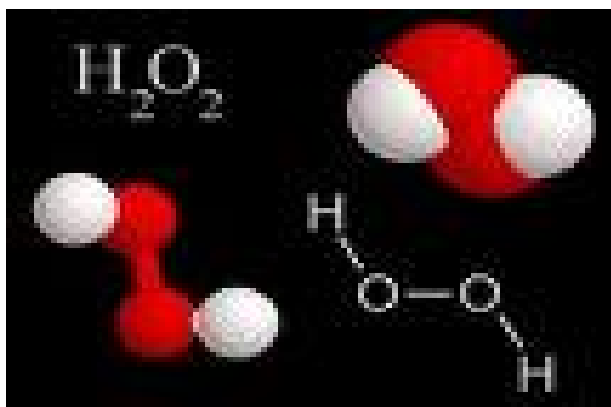


Рис. 21. Химические формулы

*Порядок написания формул.* В эмпирических формулах минералов, используемых в учебниках и специальной литературе, принято:

- В начале записывать катионы в порядке возрастания их валентности. Для катионов одинаковой валентности в начале пишут более сильные.
- Для обозначения изоморфных замещений используют круглые скобки, замещающие друг друга катионы пишут через запятые и в порядке, соответствующем их количественному значению. В круглых же скобках пишется гидроксильная группа (ОН).
- Радикалы или комплексные анионы заключают в квадратные скобки и перечисляют в порядке понижения их разрядов. Например:  $[\text{PO}_4]^{3-}$ ,  $[\text{CO}_3]^{2-}$ .
- Кремнекислородные радикалы также заключают в квадратные скобки и перечисляют в порядке повышения степени полимеризации. Например:  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ,  $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$ ,  $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ .
- Добавочные ионы O,  $(\text{OH})^{1-}$ ,  $\text{F}^{1-}$  пишут до радикалов, в порядке понижения валентности, остальные добавочные анионы ( $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{Cl}^{1-}$ ) после радикалов либо для удобства и наглядности через точку в виде соответствующей соли. Например, варианты написания формулы содалита:  $\text{Na}_4[\text{AlSiO}_4]_3\text{Cl}$  или  $3\text{Na}[\text{AlSiO}_4]_3\text{NaCl}$ .

### **Химический анализ минералов. Простейшие методы пересчета химического анализа на кристаллохимические формулы**

О составе минералов можно получить представление по результатам полного химического анализа, которые выдаются в виде таблиц процентных содержаний отдельных элементов или оксидов металлов, входящих в состав минерала. Анализ считается удовлетворительным, если сумма всех компонентов составляет 100 %. Используя атомные веса отдельных элементов или молекулярные веса оксидов, можно достаточно просто рассчитать формулы минералов. Рассмотрим это на конкретных примерах (табл. 1).

Для вычисления химической формулы необходимо весовые проценты содержания элемента или оксида разделить соответственно на атомные веса элементов или на молекулярные веса оксида. В результате получаем соответствующие целые числа, являющиеся коэффициентом элемента или оксида в химической формуле минерала. Для вычисления формул более сложных по химическому составу минералов используются специальные расчеты по более сложным методикам.

Таблица 1

## Алгоритм расчета формулы

Компоненты (элементы, оксиды)	Весовые проценты С	Атомные (молекулярные) количества			Отношения атомных (молекулярных) количеств	Формула минерала
		Атомный (молекулярный) вес, А	С : А			
Cu	34,4	63,5	34,4:63,5	0,541	1	CuFeS <sub>2</sub> халькопирит
Fe	30,47	56	30,47:56	0,544	1	
S	35,87	32	35,87:32	1,120	2	
SiO <sub>2</sub>	55,12	60		0,919	4	4SiO <sub>2</sub> · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> O · 2H <sub>2</sub> O Na <sub>2</sub> [Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub> ] · 2H <sub>2</sub> O Na[AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ] · H <sub>2</sub> O анальцим
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,99	102		0,225	1	
Na <sub>2</sub> O	13,53	62		0,218	1	
H <sub>2</sub> O	8,27	18		0,459	2	

Расчет формулы граната по кислородному методу (табл. 2)

Таблица 2

## Расчет коэффициента катиона

Компоненты	Весовые содержания % (С)	Молекулярные количества С:А = 1000 = N	Атомные количества		Коэффициент
			Анионы N.n (-) = В	Катионы N.n (+) = К	
SiO <sub>2</sub>	41,7	6939	2N = 13878	N = 6939	2,982
TiO <sub>2</sub>	0,32	12	24	12	0,006
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,13	1975	5925	3950	1,694
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,67	229	687	458	0,197
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,02	133	399	266	0,114
FeO	5,47	762	762	762	0,327
MnO	0,41	58	58	58	0,025
MgO	22,32	5535	5535	5535	2,373
CaO	3,68	658	658	658	0,282
H <sub>2</sub> O	–	–	–	–	

27924

А – атомный (молекулярный) вес

Общий делитель = I : к-во атомов, O по формуле = 27924 : 12 = 2327

Коэффициент катионов = К : 2327 (общий делитель)

Проверка: Коэффициент катиона умножаем на валентность.  $[O^{2-}]_{12} = 24$ .

Среди минералов, представляющих собой химические соединения двух или нескольких элементов, различают простые соли (соединения), комплексные соли (соединения) и двойные соли.

*Простые соли* характеризуются простым химическим составом и, чаще всего, отвечают бинарным соединениям (из двух элементов). Широко распространены среди минералов классов сульфидов, оксидов, галлоидов и некоторые другие.

*Комплексные соли* пользуются также широким распространением. Характеризуются наличием определенных групп ионов, которые в химических реакциях ведут себя как единое целое. Эти группы – радикалы, а применительно к минералам – комплексные анионы. Соединения с комплексными анионами: фосфаты, вольфраматы, карбонаты, сульфаты. Комплексные анионы при образовании минералов присоединяют к себе такое количество катионов, которое необходимо им для компенсации своей отрицательной валентности.

*Двойные соли как более сложные соединения* широко распространены в природе. Они представляют собой соединения, состоящие из двух солей, находящихся между собой в кратных отношениях. Различают двойные соли по анионам, по катионам и по катионам и по анионам одновременно. Обычно встречаются двойные соли по катионам ( $\text{Ca,Mg}[\text{CO}_3]_2$  или  $\text{Ca}[\text{CO}_3]\cdot\text{Mg}[\text{CO}_3]$ )

## **Типы воды и ее роль в составе минералов**

По характеру связи между водой и другими ионами, входящими в состав кристаллической решетки минералов выделяется несколько типов: конституционная, кристаллизационная и адсорбционная.

*Конституционная вода* непосредственно входит в кристаллическую решетку в виде гидроксильных групп  $(\text{OH})^{1-}$ ,  $\text{H}^{1+}$ ,  $(\text{H}_3\text{O})^{1+}$ . Наиболее распространена группа  $(\text{OH})^{1-}$ . Удаление воды из кристаллической решетки происходит при нагревании в интервале температур от 300 до 1300 °С и связано с существенной перестройкой кристаллической или разрушением структуры соединения.

*Кристаллизационная вода* присутствует в минералах в виде молекул  $\text{H}_2\text{O}$ . Подобные минералы принято называть кристаллогидратами. Прочность связи этой воды в структуре минерала различна, чаще всего эта вода легко удаляется при температуре 300–400 °С, редко при 600 °С. Удаление воды из кристаллов обычно происходит скачкообразно, при этом так же скачкообразно меняются их физические свойства (удельный вес, твердость, показатель преломления и т. д.), что связано с изменением общей кристаллической структуры.

*Адсорбционная вода.* Это вода механически поглощенная минералами, поэтому содержание ее непостоянно. Связь между водой и веществом минерала слаба, потому она удаляется из минерала при нагревании до  $100-110^{\circ}$ . Адсорбционная вода подразделяется на гигроскопическую, коллоидную и межслоевую.

*Гигроскопическая вода* присутствует в тонких капиллярных трещинках, в порах и удерживается внутри силами поверхностного натяжения.

*Коллоидная вода* – адсорбированная. Коллоидные частицы вещества своей поверхностью адсорбируют молекулы воды, которые концентрируются вокруг нее.

*Межслоевая вода* присутствует в некоторых силикатах с типичной слоистой решеткой, отдельные слои которой своей поверхностью адсорбируют воду. Таким образом, два соседних структурных слоя вещества разделены слоем адсорбированной воды. При поглощении воды происходит набухание минерала, при удалении – сжатие. Кристаллическая решетка минерала не разрушается, происходит только изменение размеров ее параметров.

Кроме того во многих минералах присутствует вода как механическая примесь в виде мельчайших газовой-жидких включений, захваченных кристаллами во время роста.

## **Изоморфизм. Изоморфные смеси**

Понятие изоморфизм было введено в литературу в 1819 г. немецким химиком Эйльхардом Митчерлихом. Под изоморфизмом Митчерлих понимал способность родственных по химическому составу и близких по габитусу веществ образовывать вещества переменного состава. Сейчас под изоморфизмом понимается способность атомов и одинаковых по заряду ионов, обладающих близкими свойствами в переменных количествах взаимно замещать друг друга в кристаллической решетке. В результате такого замещения образуются промежуточные по составу соединения называемые «твердыми растворами». Изоморфные смеси широко распространены в природе. Ряд веществ, в которых происходит постепенное изменение состава путем замещения одних составляющих другими, называется изоморфным рядом. Изоморфизм, при котором наблюдается полный переход от одного крайнего члена изоморфного ряда к другому, называется полным или *совершенным изоморфизмом*. Например:

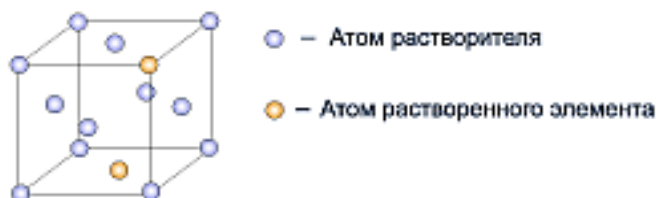
форстерит  $Mg[SiO_4]$  – оливин  $(Mg,Fe)[SiO_4]_2$  – фаялит  $Fe[SiO_4]$ .

Изоморфизм при котором не происходит полного замещения называется несовершенным или ограниченным. Ограничение содержания компонента составляет от десятков процентов до долей процента.

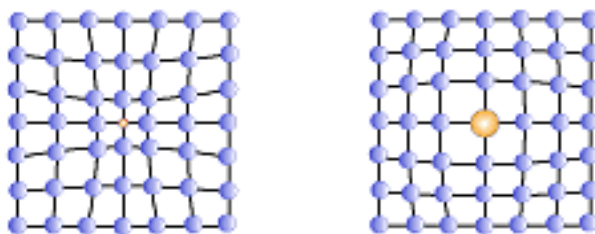
Рассеянные элементы, присутствующие в минералах в десятых, сотых, тысячных долях процентов называются изоморфными примесями.

Среди твердых растворов с генетической точки зрения различают растворы замещения – растворы 1 рода (рис. 22) и твердые растворы внедрения – растворы 2 рода (рис. 23).

Растворы такого типа образуются путем замены атомов металла - растворителя в его кристаллической решетке атомами растворенного элемента



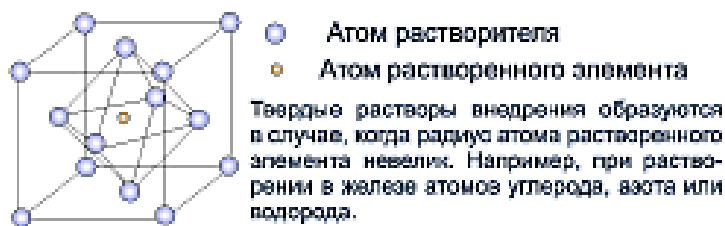
Искажения кристаллической решетки в твердых растворах замещения



Атом растворяемого элемента меньше атома растворителя      Атом растворяемого элемента больше атома растворителя

Рис. 22. Твердые растворы замещения (1 рода)

Растворы такого типа образуются путем размещения атомов растворяемого элемента в порах решетки растворителя



Искажения кристаллической решетки в твердых растворах внедрения

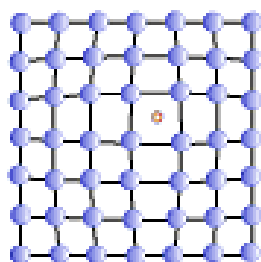


Рис. 23. Твердые растворы внедрения (2 рода)



Типичными представителями твердых растворов 1 рода являются изоморфные смеси. Причем большинство минералов относится именно к этому типу. Их характерная особенность заключается в том, что атомы или ионы замещающего компонента занимают места замещаемых атомов или ионов в кристаллической структуре минерала.

Твердые растворы 2 рода являются редкими. Отличаются от растворов 1 рода тем, что атомы или ионы одного компонента располагаются в пустотах между атомами и ионами другого компонента. Подобное явление наблюдается при высоких температурах происходящего процесса минералообразования. При понижении температуры возможность существования изоморфной смеси 2 рода нарушается, в результате чего может произойти распад на отдельные компоненты. В итоге возникают структуры распада твердого раствора.

Распад твердого раствора может происходить вследствие изменения валентности отдельных ионов, входящих в изоморфную смесь.

## Коллоидные системы и их роль в процессах минералообразования

В земной коре часто встречаются минералы, образование которых связано с коллоидными системами. *Коллоиды* – это тонкая смесь двух или нескольких веществ, не вступающих между собой в химическое взаимодействие. Причем тонкодисперсные (от 1 до 100 мк) частицы одного вещества рассеяны в массе другого вещества. Тонкодисперсные частицы называются мицеллами (рис. 24) и образуют дисперсную фазу, а вещество, в котором они находятся, называется дисперсной средой. Физическое состояние дисперсной среды может быть различным. Различают золи и гели.

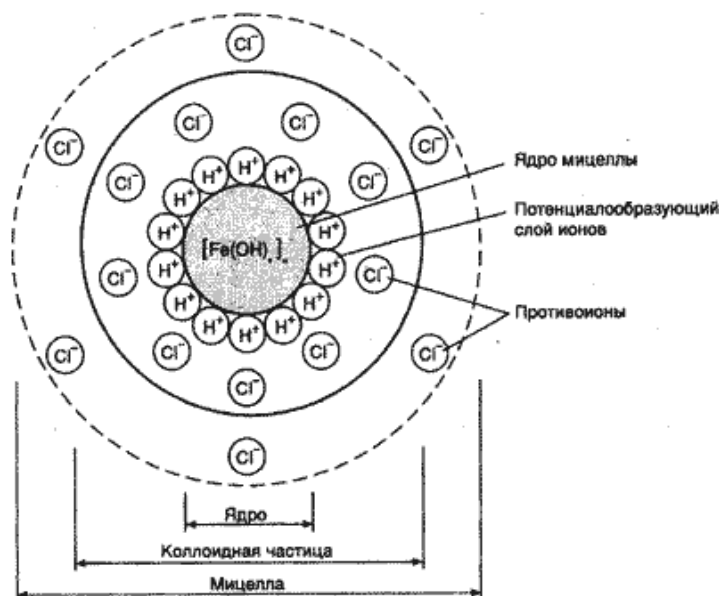


Рис. 24. Строение мицеллы

*Золи* – это когда дисперсная среда резко преобладает над дисперсной фазой. В типичных золях дисперсная среда – это вода, фазы – твердые кристаллические частицы. Отдельные мицеллы находятся в хаотичном движении. Внешне такие золи кажутся однородными, напоминают обычные растворы.

В *гелях* наблюдается обратное соотношение. Мицеллы присутствуют в таком большом количестве, что соприкасаясь, образуют каркас. В зависимости от характера дисперсионной среды различают: гидрозоли и гидрогели (дисперсная среда – вода), аэрозоли и аэрогели (дисперсная среда – воздух), пирозоли и пирогели (дисперсная среда – расплав), кристаллозоли и кристаллогели (дисперсная среда – кристаллическое вещество). Наибольшее распространение имеют гидрозоли, гидрогели и кристаллогели.

*Гидрозоли* наиболее просто могут быть получены механически, путем тонкого распыления или истирания вещества до размеров дисперсной фазы в воде. В природе грубо- и тонкодисперсные системы нередко образуются при перетирании и истирании горных пород и минералов под влиянием движущихся сил (водных потоков, ледников, тектонических подвижек и т. д.).



Рис. 25. Накопление ила в прибрежной зоне континентального моря

*Гидрогели* в природных условиях образуются из гидрозолей путем свертывания или как говорят путем коагуляции, выражающейся в образовании сгустков в водной среде. Процесс коагуляции наступает только в том случае, когда в силу тех или иных причин дисперсные частички теряют свой заряд, становясь электрически нейтральными. В этом случае исчезают силы отталкивания частиц друг от друга. Происходит объединение частиц в более крупные тельца, называемые *полионами*, с последующим оседанием их под действием силы тяжести. Таким путем образуются мно-

гие илистые осадки в устьях больших рек, выносящих коллоидные растворы, которые под действием солей, растворенных в морской воде, подвергаются коагуляции и осаждению в прибрежных морских бассейнах.

Образование гелей в ряде случаев связано с жизнедеятельностью бактерий. Так называемые железобактерии, перерабатывая илистые озерные осадки, постепенно отлагают коллоидные гидроксиды железа (лимонит). Гидрогели с течением времени подвергаются «старению», т. е. постепенному изменению состава и строения. Это изменение, прежде всего, выражается в том, что вещество постепенно теряет воду, т. е. подвергается дегидратации (обезвоживанию). Характерный пример – гидрогели кремнезема – опалы. Богатые водой гидрогели кремнезема имеют консистенцию полужидких масс – студней. При постепенной потере воды они становятся все более и более твердыми, стекловидными или полуматовыми, в изломе эти образования характеризуются незаметной на глаз и под обычным микроскопом пористостью. В случае сильного проявления дегидратации возникает заметная на глаз пористость, а иногда сморщивание массы или появление характерных трещин усыхания в виде сеток. Возникают образования в виде сфероидальных стяжений называемые септариями (рис. 26).

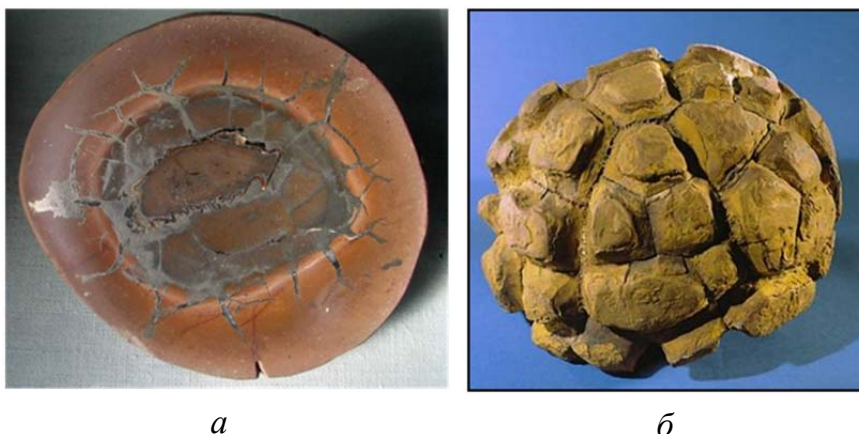


Рис. 26. Септарии: *а* – сидерита; *б* – лимонита

*Кристаллозоли* – это типичные кристаллические среды, содержащие в себе в виде дисперсной фазы какое – либо вещество, часто образуется в результате кристаллизации гидрозолей. Этот процесс можно сравнить с кристаллизацией мутной воды, т. е. воды содержащей во взвешенном состоянии дисперсные частицы. Образовавшийся лед также будет мутным, т. е. загрязненным той же дисперсной фазой, иначе говоря, он будет представлять собой кристаллозоль (рис. 27).

Сюда же можно отнести разноокрашенные виды кварца, некоторые разновидности карбонатов, сульфатов, силикатов (рис. 27, *б*) цвет которых обусловлен в некоторых случаях тонкораспыленными в них суль-

фидами, оксидами, в других – органическими веществами либо дисперсными фазами газа или жидкости, часто видимых в тонких шлифах под микроскопом.

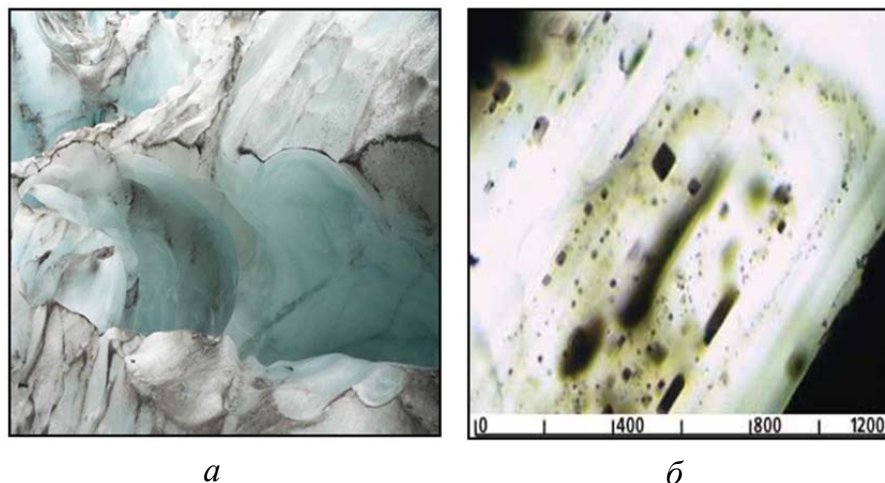


Рис. 27. Кристаллозоли: а – лед; б – плагиоклаз

### Полиморфизм

Способность отдельного химического вещества кристаллизоваться больше, чем в одном типе структуры называется *полиморфизмом*. Различные структуры химического элемента или химического соединения называются *полиморфными модификациями*. Примеры полиморфных модификаций некоторых веществ даны в табл. 3

Таблица 3

#### Полиморфные модификации минералов

Состав	Название минерала	Сингония	Твердость	Уд. вес
C	алмаз	кубическая	10	3,52
	графит	гексагональная	1	2,23
FeS <sub>2</sub>	пирит	кубическая	6	4,99
	марказит	ромбическая	6	4,85
CaCO <sub>3</sub>	кальцит	тригональная	3	2,71
	арагонит	ромбическая	3,5	2,93
SiO <sub>2</sub>	кварц низкотемпературный	тригональная	7	2,65
	кварц высокотемпературный	гексагональная	7	2,53
	тридимит	гексагональная	7	2,20
	кристобалит	кубическая	6,5	2,20
	коэсит	моноклинная	7,5	3,01
	стишовит	тетрагональная	7,5	4,30

Различают несколько типов механизмов, посредством которых полиморфные модификации могут переходить одна в другую; это – смещение и перестройка.

При полиморфизме типа смещения внутренние изменения при переходе от одной структуры к другой очень малы и требуют мало энергии. Структура остается полностью нетронутой, происходит небольшое смещение атомов и ионов без разрыва связей между ними и изменяются только углы связей (сгибание). Этот тип превращений наблюдается постоянно и он обратим. Например низкотемпературная форма кварца при нагревании выше 573 °С при атмосферном давлении перестраивает свою структуру в структуру высокотемпературного кварца (рис. 28).

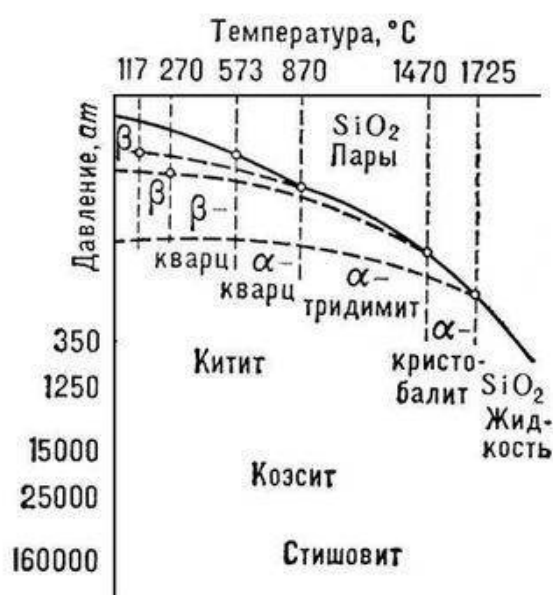


Рис.28. Термодинамическая схема полиморфных переходов кварца

Полиморфные модификации типа перестройки образуются с разрывом связей и объединением структурных единиц в другом положении. Этот тип трансформации требует значительного количества энергии, и очень длителен. Пример перехода графита в алмаз. Данный процесс осуществляется при значительных изменениях температур и давления внешней среды.

Обычно высокотемпературная модификация какого – либо минерала при превращении в более низкотемпературную сохраняет внешнюю форму первоначальных кристаллов. Такие случаи ложных форм носят название *параморфоз*. Примером могут служить параморфозы кальцита по арагониту.

Существование минералов с внешней формой другого минерала известно как псевдоморфизм. Если в кристалле минерала внутренняя структура или химический состав изменяется при сохранении внешней

формы, то это называется *псевдоморфозой*. Химический состав или структура псевдоморфозы соответствует одному минеральному виду, в то время как внешняя форма – другому. Например, пирит может превратиться в лимонит, сохранив все внешние особенности кубических форм пирита. Такой кристалл описывается как псевдоморфоза лимонита по пириту. Псевдоморфозы обычно подразделяются по способу их образования.

*Замещение* (рис. 29). В этом типе происходит постепенное удаление первоначального материала и одновременное замещение его другим, без химической реакции между ними. Обычный пример – замещение кремнеземом древесных волокон с образованием окаменевшего дерева. Другой – замещение кварцем флюорита.

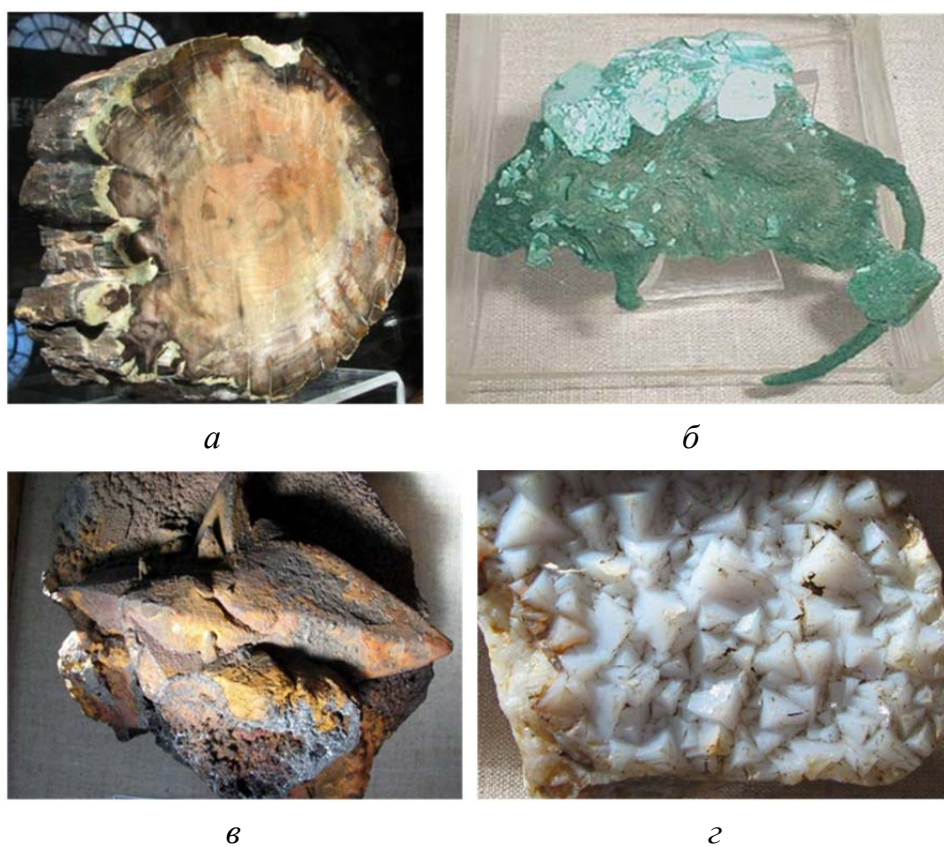


Рис. 29. Псевдоморфозы замещения: а – кремнистая древесина; б – халькантит по мышьяку; в – гидроксиды железа по кальциту; г – кварц по флюориту

*Инкрустация*. При образовании этого типа псевдоморфоз корочка одного минерала отлагается на кристалле другого. Обычный пример – это кварц, обросший кристалликами флюорита. Флюорит может позднее быть полностью унесен растворами, но прямоугольные углубления, оставленные в кварце, указывают на его бывшее присутствие. Так образуются футляровидные кристаллы (рис. 30).

*Изменение.* В этом типе псевдоморфоз происходит только частичное удаление первичного вещества или частичный привнос материала. Примером псевдоморфоз этого типа является переход ангидрита в гипс или переход галенита в англезит. В таких псевдоморфозах можно иногда найти сердцевину из неизмененного минерала (рис. 31).



*Рис. 30. Псевдоморфоза типа инкрустация с образованием футляровидного кристалла (аметист по кальциту)*



*а*



*б*

*Рис. 31. Псевдоморфозы изменения: корочка кварца на флюорите (сердцевина)*

## Физические свойства минералов

Минералы как физические тела обладают определенным весьма разнообразным набором таких свойств как цвет, твердость, блеск, удельный вес и т. д. В зависимости от химического состава и кристаллической структуры эти свойства проявляются по-разному. Каждый минерал характеризуется особыми признаками, по которым его всегда можно отличить от других. Очень многие минералы можно совершенно точно определить по комплексу характерных физических свойств, не прибегая к более трудоемким исследованиям, как например к химическому или рентгеноструктурному анализу. В далеком прошлом, когда люди не имели представления о химических элементах и химии вообще, по особым признакам «рудознатцы» безошибочно находили полезные ископаемые, которые в то время представляли для них ценность. Нельзя конечно сказать, что таким путем можно определить все встречающиеся в природе минералы. Многие требуют более детальных исследований, в частности применения качественных микрохимических реакций, определения удельного веса, механических свойств и т. д. Мы остановимся лишь на разборе важнейших свойств, необходимых для макроскопического определения.

К этим свойствам относятся:

- *морфологические особенности*: облик кристаллов и агрегатов, двойники, скульптура граней;
- *оптические*: цвет минералов, цвет черты минерала, прозрачность, блеск;
- *механические*: спайность, излом, твердость, хрупкость, ковкость, упругость, а также такие свойства как *удельный вес, магнитность и радиоактивность*.

## Морфологические особенности минералов

Минералы в виде отдельных кристаллов или их сростков встречаются редко. большей частью мы имеем дело с минеральными агрегатами. Под минеральным агрегатом понимается скопление незакономерно сросшихся между собой кристаллических зерен минералов, образованных в результате естественных минералообразующих процессов.

В зависимости от количества входящих в агрегат минералов различают мономинеральные и полиминеральные агрегаты. Существенное значение при описании имеет степень кристалличности минерального вещества, различают явно кристаллические агрегаты, скрытокристаллические и коллоидные, тонкодисперсные минеральные массы. По величине составляющих зерен различают следующие агрегаты:



1. Грубозернистые – более 10 мм
2. Крупнозернистые – 5–10 мм
3. Среднезернистые – 1–5 мм
4. Мелкозернистые – менее 1 мм
5. Тонкозернистые или плотные – зерна на глаз не различимы.

По относительному размеру: равномернoзернистые и неравномернoзернистые агрегаты.

По форме зерен: собственно кристаллы и кристаллические (зернистые) агрегаты. Габитус кристаллов по общим морфологическим признакам подразделяется на несколько групп:

1. Кристаллы изометрического облика (равные в 3 направлениях). Минералы, кристаллизующиеся в кубической сингонии (гранат, хромшпинелиды, магнетит, галит, флюорит и прочие).

2. Формы, вытянутые в одном направлении: призматические, столбчатые, шестоватые, игольчатые, волокнистые, волосовидные (амфиболы, пироксены, турмалин, берилл, дистен, волластонит и др.).

3. Формы вытянутые в двух направлениях и сжатые в третьем. Сюда относятся таблитчатые, пластинчатые, чешуйчатые, листоватые кристаллы (слюды, хлориты, сульфаты).

Существуют различные переходные формы кристаллов и агрегатов усложненные, такие как скелетные формы и дендриты. Следует отметить следующие формы:

1. *Секреции* (рис. 32, а) образуются в результате заполнения округлых, овальных или неправильной формы пустот в горных породах различного генезиса. Отложение вещества идет от периферии пустотки к центру, поэтому секреция обычно имеет зональное строение. При крупных размерах пустот центральная часть остается свободной, где наблюдаются друзовидные образования. По размерам секреции подразделяются на миндалины (до 10 мм в диаметре) и жеоды (более 10 мм).



а



б

Рис. 32. Секреция барита (а); глинисто-карбонатная конкреция (б)

2. *Конкреции* (рис. 33) – минеральные образования округлой, сферической, овальной формы, нередко с гладкой поверхностью. Возникают, как правило, в осадочных горных породах или действующих водных бассейнах. Рост или наращивание вещества идет от центра (затравки) к периферии. Размер конкреций колеблется от мм до нескольких десятков м (фосфориты, марказит, Fe-Mn конкреции и др).



Рис. 33. Фосфоритовая конкреция (а), фрагмент фосфоритовой конкреции с радиально-лучистым строением (б)

3. *Оолиты* (рис. 34) – скопление сферических минеральных образований размером не более 10 мм каждое. Характеризуются концентрическим строением. Впоследствии оолиты могут сцементироваться, с образованием характерных осадочных пород с оолитовой структурой (бокситы, магнетитовые, гетит-гидрогетитовые (болотные) руды и др.).



Рис. 34. Боксит (а); болотные мелкооолитовые руды (б)

4. *Сферолиты* – сферические образования, которые в отличие от оолитов характеризуются радиально – лучистым строением. Каждый такой лучик представляет собой кристалл сильно вытянутый в одном направлении (рис. 35, а, б).

5. Натечные формы – образуются в пустотах и полостях при участии коллоидных растворов, которые циркулируют в пустотах и полостях, постепенно обволакивая стенки. Происходящая коагуляция коллоидных растворов, образование и затвердевание гелей приводит к формированию плотных масс почковидной, гроздевидной формы (рис. 35, в). Как частный случай следует отметить образование сталактитов и сталагмитов (рис. 35, г) в карстовых пустотах (пещерах). В результате раскристаллизации гелей образуется радиально-слоистая, лучистая структура (малахит, арагонит). Натечные формы обладают гладкой блестящей поверхностью.

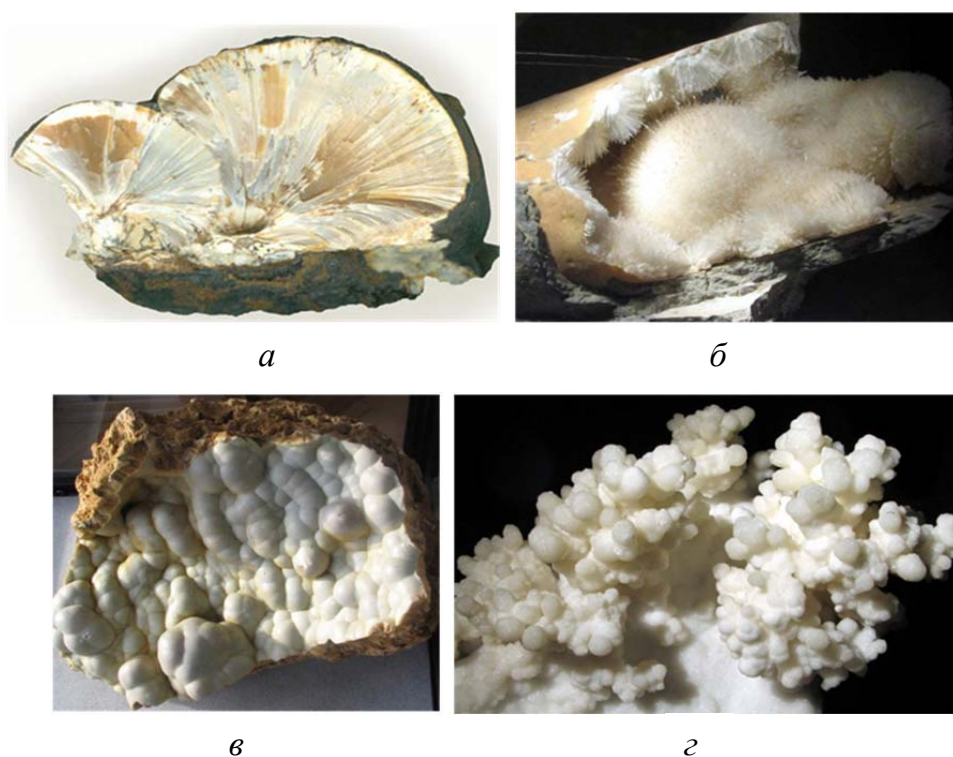


Рис. 35. Сферолиты: а – барита; б – натролита; в – почковидные натечи апатиткарбоната; г – кораллит (сталагмит) арагонита (г)

6. Землистые массы (рис. 36) – рыхлые сажистые охристые скопления минерального вещества, которые возникают при химическом выветривании различных минералов. Как правило, представляют собой тонкодисперсные, тонкозернистые соединения сульфатов, оксидов и гидроксидов железа, марганца, меди и других металлов.

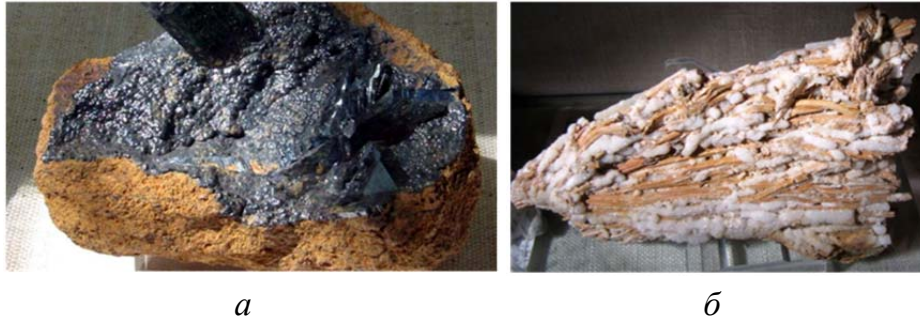


Рис. 36. Землистые корки: а – вивианита; б – сервантита

7. Налеты, примазки, присыпки – тонкие корочки, пленки тонкокристаллических агрегатов на поверхности других минералов или горных пород. Такие образования характерны для минералов постмагматического и экзогенного происхождения.

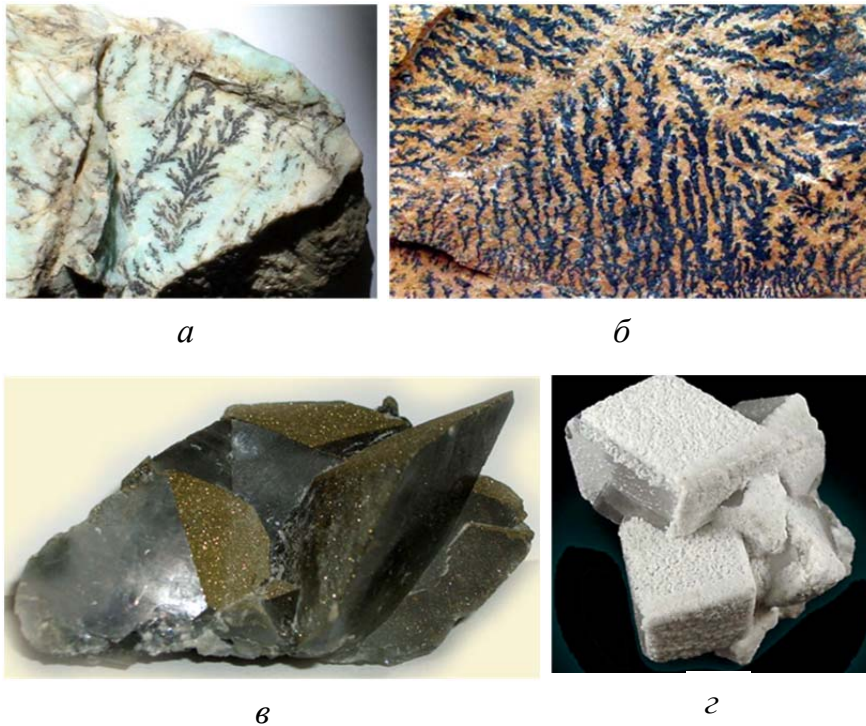


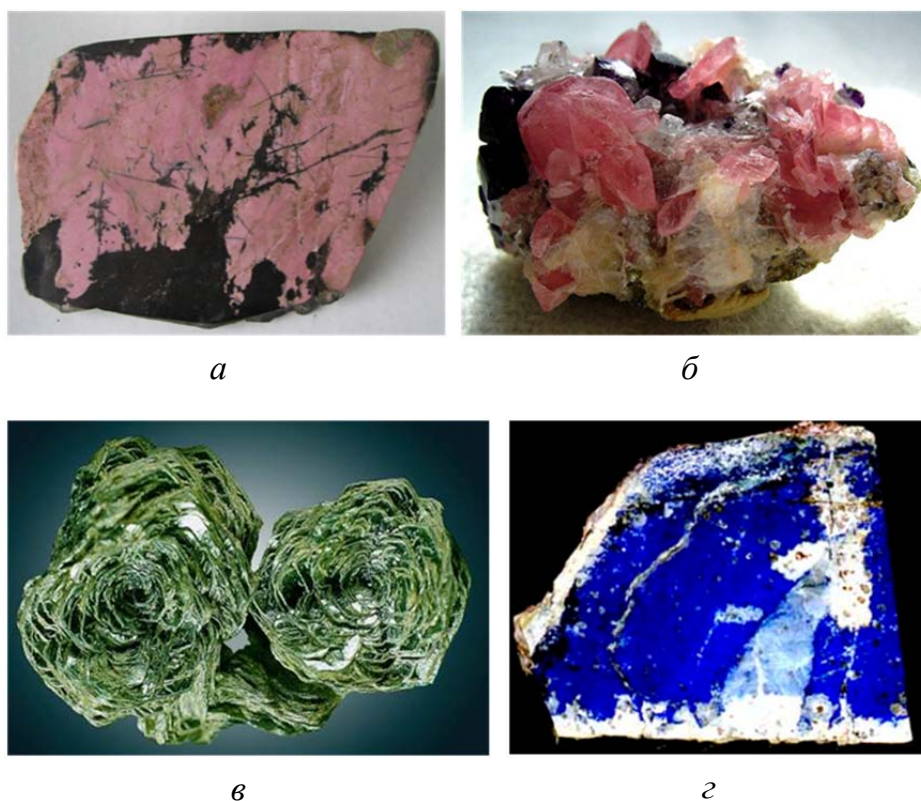
Рис. 37. Налеты: а – псиломелан на амазоните; б – флюорит на микроклине; присыпки: в – халькопирит на кальците; г – кальцит на барите

8. Выцветы – тонкие минеральные пленки, появляющиеся на поверхности других минералов, пород, почв, образуются минералами, хорошо растворимыми в воде. Появляются в сухие сезоны, во влажное время исчезают. Такие выцветы образуют галоиды, сульфаты щелочных металлов.

## Оптические свойства минералов

Оптические свойства воспринимаются визуально и относятся к диагностическим признакам минералов. Это – цвет, цвет черты минерала, прозрачность и блеск.

*Цвет* минералов является наиболее важным диагностическим свойством. Названия некоторых минералов содержат упоминания цвета: розовый – родонит, родохрозит, хлориты («хлорос» (греч.) – зеленый), аурипигмент (золотистый цвет), меланит («меланос» (греч.) – черный), лазурит и пр. (рис. 38).



*Рис. 38. Родонит с гидроксидами марганца (а); родохрозит (б); хлорит (в); лазурит (г)*

Природа окраски минералов довольно сложна. Цвет возникает в результате избирательного поглощения части светового луча, проходящего через минерал. Способность минерала поглощать световые лучи зависит от характера атомов и ионов, слагающих кристаллическую решетку минерала, их координационного числа, от поляризационных свойств, типа химической связи т. д. Вопросами природы цветовой окраски минералов занимались многие минералоги прошлых столетий. В 1824 г русским ученым В.Н. Севергиным были выделены 3 типа

окраски: собственная, зависящая от посторонних примесей и случайная. В 1936 г в результате более детальных работ академика А.Е. Ферсмана эти типы были названы соответственно: идиохроматическая окраска (1), аллохроматическая (2) и псевдохроматическая (3).

1. *Идиохроматический цвет*. «Идиос» (греч.) – свой, собственный. Собственная окраска минералов обусловлена внутренним строением, особенностями кристаллической структуры, присутствием элементов – хромофоров, входящих в кристаллическую решетку, их валентностью и координационным числом либо дефектами самой кристаллической решетки.

Основными элементами хромофорами являются Mn Fe Cr Cu. следует иметь в виду, что один и тот же элемент – хромофор в разных кристаллических структурах может вызвать разную окраску. Например,  $\text{Cr}^{3+}$  в структуре берилла вызывает зеленую окраску (изумруд), а в структуре корунда – красную (рубин). С другой стороны, разные элементы – хромофоры могут давать один цвет. Например, зеленый цвет может быть обусловлен  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ .

В общем случае следует помнить, что Mn обуславливает розовую окраску в силикатах и черную в оксидах и гидроксидах (рис. 38, а); Fe придает зеленую окраску силикатам и бурую оксидам и гидроксидам (рис. 39, а, б); Cr – зеленую и красную силикатам, красную-оксидам (корунд) (рис. 39, в, г); Cu придает карбонатам, фосфатам, сульфатам и силикатам как зеленую, так и синюю окраску (рис. 39, д, е).

Идиохроматизм такое же неотъемлемое свойство минерала как его плотность. Большая часть минералов обладает идиохроматической окраской. При описании цвета минерала обычно используют физическую шкалу цвета (цвета спектра): красный – оранжевый – желтый – зеленый-голубой-синий-фиолетовый, дополнительные ахроматические цвета: серый, белый, черный. При более детальной характеристике используют бытовые определения, например: молочно-белый, яблочно-зеленый, стально-серый, латунно-желтый, ржаво-бурый и т. д.

2. *Аллохроматический цвет*. «Аллос» (греч.) – посторонний. Окраска минерала зависит от посторонних механических примесей (механических включений других окрашенных минералов, пузырьков газо-жидких включений т. д.). Эта окраска не связана непосредственно химическим составом минерала. Она изменчива и непостоянна. Примером служить кварц: часто молочно-белый цвет его обусловлен наличием мельчайших не видимых глазу газо-жидких включений. Кирпично-красный цвет обусловлен обычно тонкодисперсными включениями гематита (рис. 40). Эта разновидность кварца носит свое собственное название «компостельский рубин».



*a*



*б*



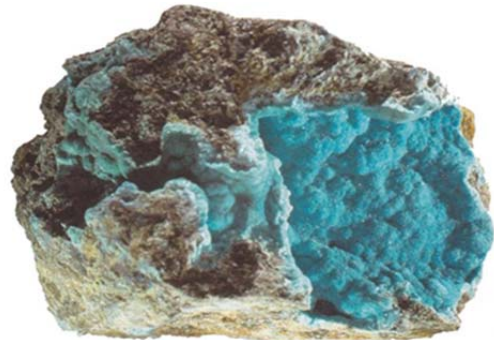
*в*



*г*



*д*



*е*

*Рис. 39. Fe – клинохлор (а); гемит (б); хромдиоксид (в); Cr – клинохлор (г); азурит, малахит (д); хризоколла (е)*

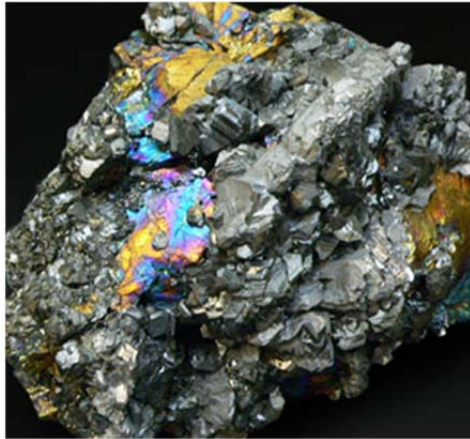


*а*

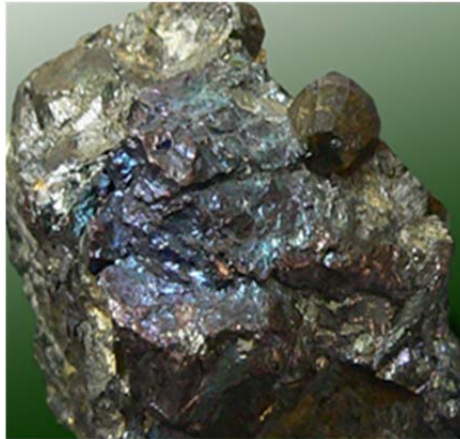


*б*

*Рис. 40. Молочно-белый кварц (а); «компостельский рубин» (б)*



а



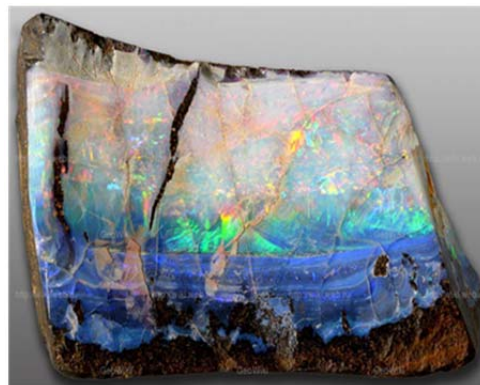
б



в



г



д



е

*Рис. 41. Побежалость: а – халькопирит; б – борнит;  
в – иризация лабрадорита; г – анортита;  
опалесценция: д – благородный опал; е – огненный опал (е)*



3. *Псевдохроматический цвет.* «Псевдос» (греч.) – ложный. Данная окраска обусловлена рассеянием белого света и интерференцией световых волн в поверхностных слоях минерала, в связи с особенностями образования или несколько измененных процессом выветривания. К этому типу окраски относятся такие проявления как *побежалость* (халькопирит, ковеллин), *иризация* – явления светового отлива, связанные с определенной ориентировкой плоскостей спайности или субмикроскопическими ориентированными включениями (лабрадор, лунный и солнечный камни). *Опалесценция* – радужные многоцветные переливы вызваны микроглобулярным строением аморфного кремнезема (рис. 41).

*Цвет черты минералов* – цвет порошка, оставленный минералом на неглазурованной поверхности фарфоровой (фаянсовой) пластинки. Цвет черты более постоянен, чем цвет самого минерала. В одних случаях цвет черты совпадает с цветом минерала (киноварь, аурипигмент, азурит), в других – несколько отличается. Важное значение цвет черты имеет для темноокрашенных прозрачных и полупрозрачных минералов. Как правило, у таких минералов черта светлоокрашенная. Кроме того по цвету черты в некоторых случаях можно судить о химическом составе вещества. У сфалерита цвет черты меняет оттенки от бесцветного у клейофана до темно-бурого у марматита в зависимости от количества примесного железа. Вольфрамит марганецсодержащий (гюбнерит) характеризуется желто- бурой чертой, а железосодержащий вольфрамит (ферберит) имеет темно-бурый цвет черты.

*Прозрачность* минерала обусловлена способностью вещества пропускать световые лучи (рис. 42). По степени прозрачности выделяют:

- прозрачные (горный хрусталь, исландский шпат)
- полупрозрачные (каменная соль, кальцит)
- непрозрачные (сульфиды, оксиды).

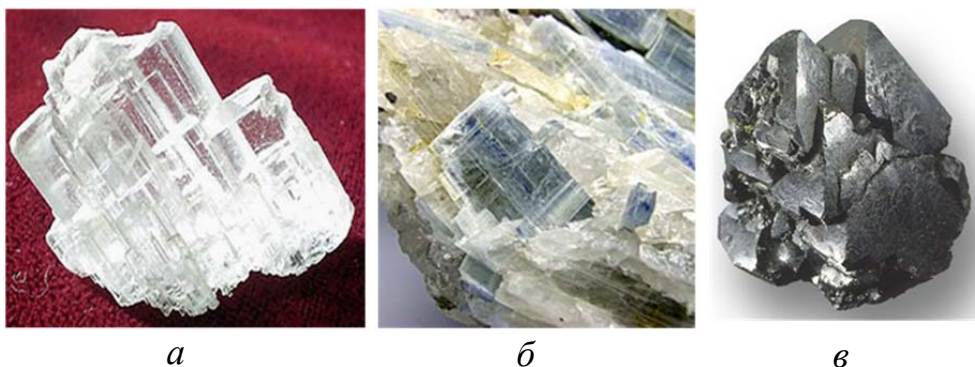


Рис. 42. Прозрачный гипс (а); полупрозрачный дистен (б); непрозрачный магнетит (в)

Некоторые минералы в крупных агрегатах кажутся непрозрачными, в то время как в тонких пластинках являются прозрачными (слюды). Прозрачность понижается, если минерал находится в мелкозернистом, тонкодисперсном, раздробленном состоянии или имеется обилие механических примесей или газовой-жидких включений.

*Блеск* – свойство минерала отражать световые лучи от поверхности граней кристалла. Блеск почти не зависит от окраски минерала. Выделяют следующие категории блеска: стеклянный, алмазный, полуметаллический, металлический. Большая часть минералов имеет стеклянный блеск (силикаты, карбонаты), широко распространены минералы с металлическим блеском (рудные: сульфиды, оксиды). Число минералов с алмазным и полуметаллическим блеском ограничено. Блеск определяется на гранях, плоскостях спайности, на ровных поверхностях скола. Блеск зависит от характера отражающей поверхности. От неровных поверхностей происходит неравномерное отражение лучей света. Бугорчатые и ямчатые поверхности дают, как правило, жирный блеск. Пример каменной соли. На свежем изломе блеск стеклянный, с течением времени, вследствие коррозии поверхности, тускнеет, как бы жирнеет. Типичным жирным блеском обладает нефелин (поверхностные изменения) и сера. Поверхности с более грубо выраженной неровностью обладают восковым блеском. Такой блеск характерен для скрытокристаллических и аморфных масс (кремни, минералы галлуазит – гарниеритового ряда). Тонкодисперсные массы обладают тонкой пористостью, которые являются как бы «ловушками» света. Минералы этого типа характеризуются матовым блеском (мел, каолин).

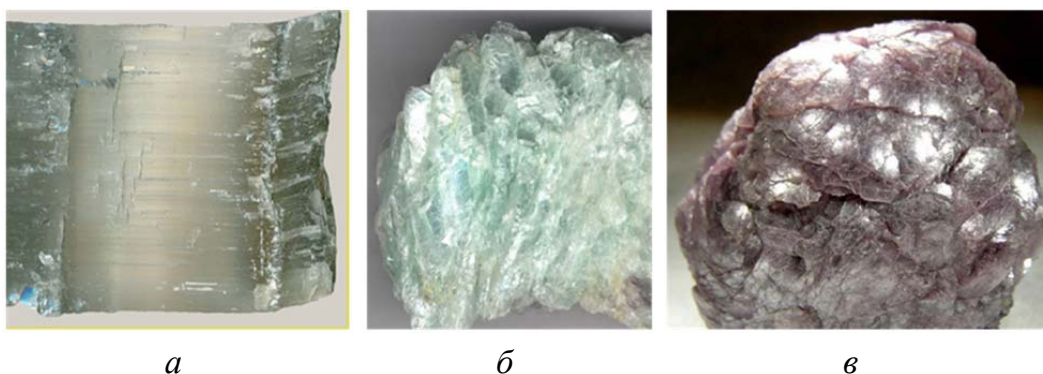


Рис. 43 Шелковистый отлив гипса (а); перламутровый отлив талька (б); лепидолита (в)

В минералах с параллельно – волокнистым строением наблюдается своеобразное явление, связанное с блеском – так называемый *шелковистый отлив* (асбест, немалит, селенит). В прозрачных минералах, обладающих слоистой структурой и в связи с ней совершенной спайностью

отмечается *перламутровый отлив* (мусковит, гипс, тальк). В том, что перламутровый отлив связан со слоистостью легко убедиться, если взглянуть сверху на пачку тонких оконных стекол.

## Механические свойства минералов

Спайность, излом, отдельность, твердость, ковкость, хрупкость, упругость – свойства, проявляющиеся при механическом воздействии на минерал.

*Спайностью* называется способность минералов раскалываться по зеркально ровным блестящим поверхностям. Это свойство кристаллов связано с внутренним строением и для одного и того же минерала спайность не зависит от внешнего вида кристаллов. Кальцит обладает разнообразными кристаллическими формами, но раскалываться будет на сколь угодно малые осколки ромбоэдрического облика. Очень важный в практическом отношении диагностический признак. По степени совершенства проявления спайности различают следующие категории:

1. *Спайность весьма совершенная* (слюды, хлориты). Кристалл раскалывается на тонкие листочки, получить излом в каком – то другом направлении очень трудно (рис. 44).



*а*

*б*

Рис. 44. Мусковит (а); хлорит (б)

2. *Спайность совершенная* (кальцит, галенит, галит, флюорит). При ударе молотком всегда получают объемные выколки по спайности.

3. *Спайность средняя (ясная)* обнаруживается в кристаллах полевых шпатов, амфиболов). На обломках минералов видны как плоскости спайности, так и неровные изломы по случайным направлениям.

4. *Спайность несовершенная* (апатит, касситерит, самородная сера). Обнаруживается с трудом. Изломы, как правило, представляют собой неровные поверхности.



*а*



*б*

*Рис. 45. Флюорит (а); кальцит (б)*



*а*



*б*

*Рис. 46. Санидин (а); диопсид (б)*



*а*



*б*

*Рис. 47. Апатит (а); сера (б)*



*а*



*б*

*Рис. 48. Фрагмент кристалла дымчатого кварца (а); опала (б)*

5. *Спайность* весьма несовершенная, практически отсутствует. Такие тела имеют обычно раковистый излом, т. е. похожий на створку раковины с концентрически расходящимися ребрами (опал, кремьнь).

В различных минералах обладающих спайностью плоскости спайности ориентированы по плоскостям кристаллических решеток. Поскольку тип кристаллической решетки у минералов разный, соответственно и спайность проявляется по – разному. У галита и галенита – по кубу, у карбонатов – по ромбоэдру, у амфиболов и пироксенов – по призме, у слюд и хлоритов – по пинакоиду.

Кроме спайности в кристаллах отмечается *отдельность*. В отличие от спайности поверхности отдельности не являются строго плоскими, бывают густо расположены, ориентированы в одном направлении и, большей частью, наблюдаются поперек удлинения кристалла (берилл, апатит, турмалин).

*Излом* – это поверхность раскола прошедшего в минерале не по спайности. В зависимости от характера этой поверхности изломы бывают ровные, неровные, ступенчатые, занозистые, раковистые. Ровным называют излом, если его поверхность действительно ровная, хотя и не зеркально гладкая как у спайности. Занозистый излом похож на излом древесины поперек волокон.

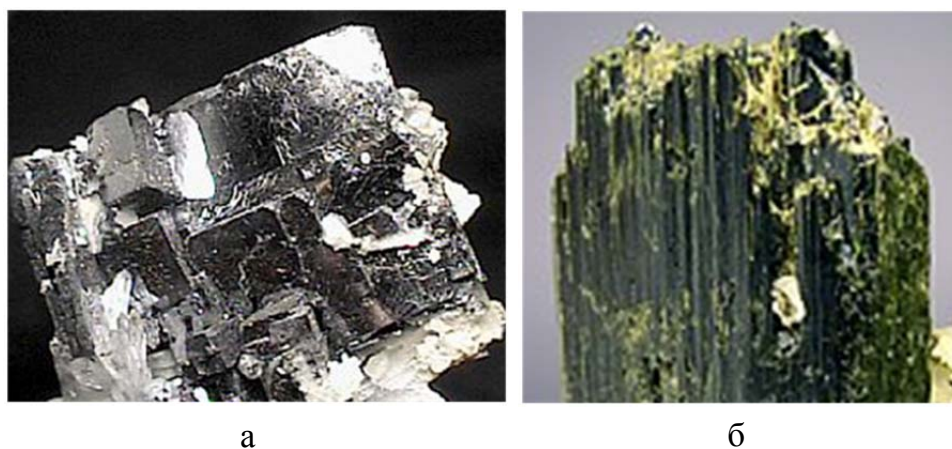


Рис. 49. Ступенчатый излом галенита (а); занозистый излом роговой обманки (б)

*Твердость* – степень сопротивления, которое оказывает минерал какому-либо внешнему воздействию, в частности, царапанию.

В обычной практике применяется наиболее простой способ определения твердости царапанием одного минерала другим, т. е. устанавливается относительная твердость минералов.

Для оценки этой твердости используется шкала Мооса (рис. 50), в которой каждый последующий минерал царапает предыдущий. За эта-

лоны этой шкалы приняты следующие 10 минералов в порядке возрастания твердости от 1 до 10 соответственно.

Определение твердости испытуемого минерала производится путем установления какой из эталонов он царапает последним. Например, исследуемый минерал царапает апатит, а ортоклаз – нет. Значит его твердость между 5 и 6. Этот простой метод вполне достаточен при визуальной диагностике минералов. Более точное определение твердости минерала производится с помощью приборов называемых твердомерами (ПМТ-3) основным устройством которых являются алмазные пирамидки (инденторы).

	Тв.1 <b>талек</b> $Mg_3(Si_4O_{10}) \cdot (OH)_2$		Тв. 2 <b>гипс</b> $Ca(SO_4)2H_2O$
	Тв. 3 <b>кальцит</b> $Ca(CO_3)$		Тв. 4 <b>флюорит</b> $CaF_2$
	Тв. 5 <b>апатит</b> $Ca_5(PO_4)_3 \cdot (F, Cl)$		Тв. 6 <b>ортоклаз</b> $K(AlSi_3O_8)$
	Тв.7 <b>кварц</b> $SiO_2$		Тв.8 <b>топаз</b> $Al_2(SiO_4)F_2$
	Тв.9 <b>корунд</b> $Al_2O_3$		Тв.10 <b>алмаз</b> C

Рис. 50. Шкала относительной твердости минералов (Мооса)

В том случае, когда нет шкалы твердости, пользуются более простыми способами, широко применяемыми в полевой обстановке. Предметами, заменяющими шкалу, могут быть: ноготь (тв. 2–2,5), медная монета (тв. 3–4), стекло (тв. 5), лезвие ножа, стальная игла (тв. 6).

*Ковкость, хрупкость и упругость.* Эти свойства при диагностике минералов имеют второстепенное значение. Однако для ряда минералов они являются весьма характерными. Практически хрупкость и ковкость определяется путем проведения царапин на минерале или ударным механическим воздействием. *Хрупкие* минералы распадаются при ударе на остроугольные обломки. Царапина имеет вид матовой бороздки с порошком данного минерала. *Ковкие* при ударе закругляются, сминаются, сплющиваются, царапина представляет собой блестящий след.

*Упругость* – свойство минерала под давлением внешних сил деформироваться, а по мере прекращения действия этих сил восстанавливать форму. Слюды – гибкие и упругие, хлориты – гибкие, но не упругие. Эти свойства зависят от химического состава минерала, характера кристаллической структуры, от прочности сил связи между узлами кристаллической решетки.

## Прочие свойства минералов

*Удельный вес* минералов при полевой работе обычно определяется приблизительно взвешиванием на руке. Для этого необходимо, чтобы он имелся в значительном количестве, чтобы ощутить его тяжесть и был, по возможности, свободен от примеси других минералов. Точное определение удельного веса производится лабораторными методами.

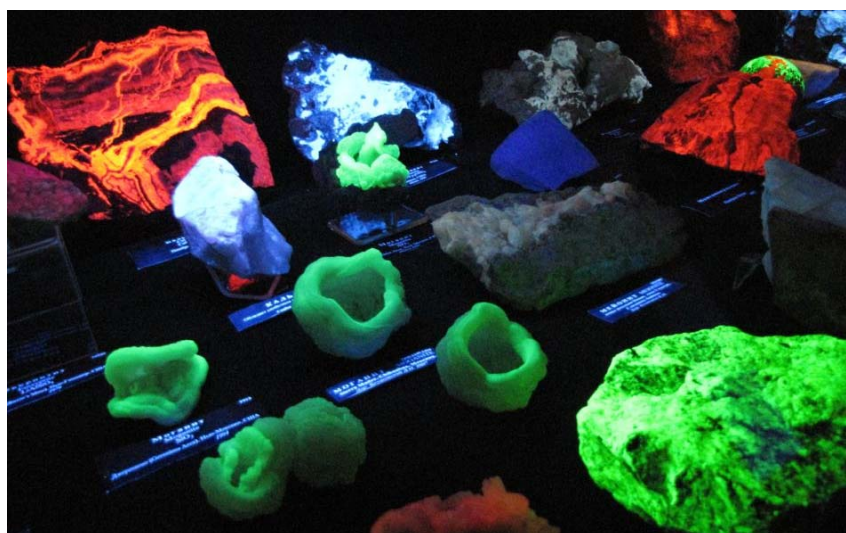
*Магнитность.* Магнитных минералов не так много. Типичными представителями таких минералов являются магнетит и пирротин. Магнитность легко обнаруживается с помощью магнитной стрелки компаса или притягиванием магнита или мелких металлических деталей к поверхности минерала (рис. 51).

Ряд других минералов обладает *вкусом*, как правило, подобными особенностями обладают минералы группы галоидов (соленый галит, горько-соленый сильвин). Некоторые обладают *запахом*. Общеизвестен запах глины; арсенопирит при разбивании молотком или при высекании искр издает запах чеснока.

*Гигроскопичность.* Это способность некоторых минералов притягивать влагу. Обладающие этим свойством минералы прилипают к языку. В большой степени гигроскопичны каолин, галлуазит, микропористый кремнезем (трепел).



*Рис. 51. Притягивающие свойства магнетита*



*Рис. 52. Витрина с люминесцирующими минералами в музее Ферсмана (Москва)*

*Люминисценция* – способность минералов светиться под влиянием какого-либо энергетического воздействия. Различают фотолюминесценцию (возбуждение ультрафиолетовыми лучами), рентгенолюминесценцию (под воздействием рентгеновских лучей), катодолюминесценцию (возбуждение потоком электронов), термолюминесценцию (возбуждение нагреванием) и т. д. Наиболее просто люминесценция минералов наблюдается под действием ультрафиолетовых лучей в темноте. Иногда свечение продолжается какое-то время после отключения источника возбуждения, это «послесвечение» называется фосфоресценцией. Отмечается фиолетовое, синее, голубое, зеленое, желтое, оранжевое, красное свечение. Цвет и интенсивность свечения зависит от состава минералов и особенностей их структуры. Для некоторых минералов люминесценция является важным диагностическим свойством. По го-



лубому свечению в ультрафиолетовых лучах легко отличается шеелит (рудный минерал вольфрама) от нерудных кальцита и кварца. Широко используется рентгенолюминесценция алмаза. Он легко диагностируется по яркому голубому или желтому свечению.

## Генезис минералов

При определении минералов важно располагать сведениями не только об их внешних признаках, но и об условиях их нахождения в природе. Знание условий нахождения минералов и их генезиса (образования), оказывает большую помощь в деле поисков полезных ископаемых. К сожалению, изучение генезиса, особенно его деталей, представляет большие трудности. Дело в том, что минералообразование обычно происходит в условиях, недоступных непосредственному наблюдению. Минералы и их месторождения мы наблюдаем уже в готовом виде, спустя большие промежутки времени после возникновения. В генетическом отношении минералы разделяются на эндогенные, образующиеся в результате кристаллизации магмы при ее остывании и экзогенные, или минералы поверхностного образования, возникшие вблизи поверхности при участии различных агентов выветривания – воды, кислорода и углерода воздуха и др. Третью генетическую группу составляют метаморфические минералы, образовавшиеся на глубине в результате перекристаллизации других минералов в условиях повышенных температур и глубинного давления.

*Парагенезис минералов.* Термин был введен в геологическую литературу в 1849 г. И.А. Брейтгауптом в понимании как «совместное нахождение минералов». Однако за 40 лет до него это же понятие под названием «смежность минералов» было предложено русским минералогом В.М. Севергиным. Парагенезис следует понимать не просто как ассоциацию совместно наблюдающихся минералов, а как группу совместно образовавшихся, на той или иной стадии процесса минералообразования. Изучение ассоциаций минералов является чрезвычайно важным как в научном, так и в практическом отношении, закономерности смены минеральных парагенезисов во времени свидетельствуют об изменении физико-химических условий минералообразования. Знание типичных минералогических парагенезисов имеет большое значение. Оно не только помогает определять совместно встречающиеся минералы, но и оказывает большую услугу при поисках полезных ископаемых

## Эндогенные процессы минералообразования

Минералы, возникающие в результате этих процессов являются продуктами магматической и постмагматической деятельности: горными породами и месторождениями полезных ископаемых. Подобные минеральные ассоциации образуются в результате кристаллизации магмы по мере ее остывания. Процессы минералообразования протекают на различных глубинах и при различных, но обычно высоких температурах (600–1300 °С). Магма представляет собой силикатный расплав, состоящий на 99 % из 8 химических элементов (кроме того содержит значительные количества воды и  $\text{CO}_2$ , в меньшем количестве присутствует сера, хлор и другие летучие. Таким образом магма является сложным по составу огненно – жидким расплавом, в котором принимают участие летучие составные части. Когда магма в силу тех или иных причин проникает в верхние части земной коры, не достигая самой поверхности, она, находясь под большим давлением, начинает медленно остывать, подвергается дифференциации и раскристаллизации.

Существует определенный порядок кристаллизации различных минеральных составляющих. Эта концепция была впервые разработана американским петрологом Р. Боуэном на основе изучения текстур и минералогического состава многих типов пород и соответственного экспериментального их изучения (рис. 53).

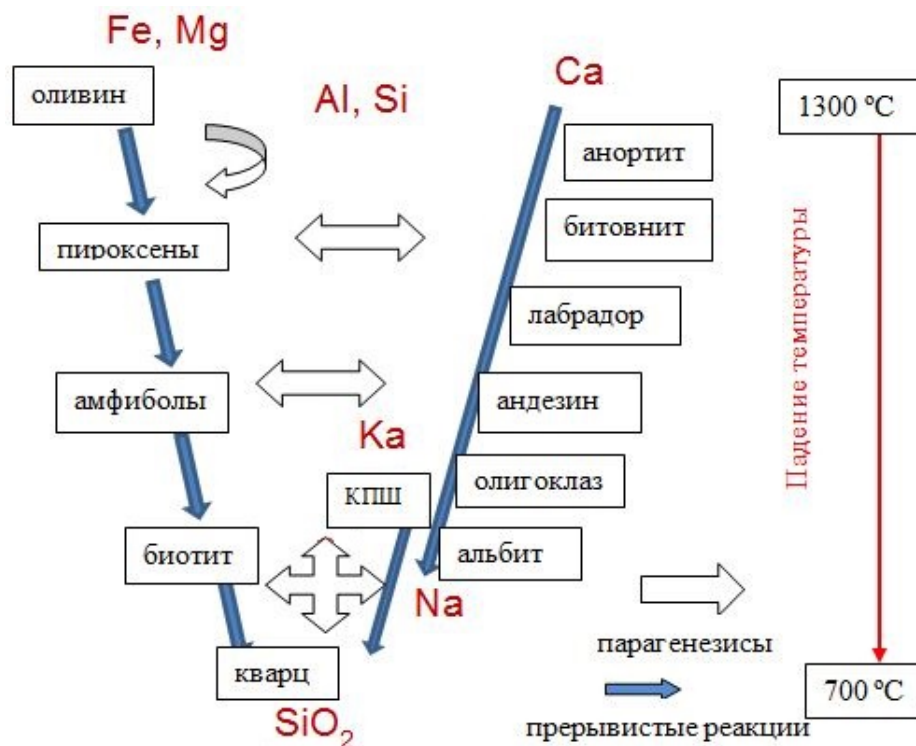


Рис. 53. Схема кристаллизации магматического расплава («ряды Боуэна»)

Прерывистые реакции протекают при четко определенных температурах, непрерывные – в какой – то ограниченной области температур. В условиях равновесия между расплавом и образующимися кристаллами прослеживается четкая последовательность кристаллизации как следствие понижения температуры. Если же ранее образованные кристаллы, выпадают в осадок под действием гравитации или удаляются из расплава тектонической деформацией, физико-химическое равновесие между кристаллами и расплавом нарушается, и в составе остающейся магмы происходят систематические изменения. Вышеупомянутые прерывистые и непрерывные реакции, а также разделение магмы и кристаллов приводят к так называемой магматической дифференциации. Все эти различные процессы и приводят к большому разнообразию изверженных пород из единой материнской магмы. Тяжелые металлы, такие как олово, вольфрам, молибден, золото, серебро, свинец, цинк, медь, присутствующие в магме в ничтожных количествах, с летучими компонентами (вода, фтор, сера, хлор, бор и т. д.) образуют летучие соединения и по мере кристаллизации магмы концентрируются в верхних частях магматических очагов. В одних случаях с их помощью образуются остаточные силикатные растворы, при участии которых возникают *пегматиты*, содержащие редкие минералы с F, B, Be, Li, Zr, а иногда с редкоземельными элементами. В других случаях они в виде газообразных продуктов удаляются из магматического очага, оказывая сильные контактные изменения на вмещающие породы, с которыми вступают в химические реакции. Наконец, в виде гидротермальных растворов – гидротерм – они уносятся по трещинам в кровлю над магматическим массивом, образуя во вмещающих породах месторождения полезных ископаемых, главным образом металлических.

Используется более дробное деление эндогенных процессов на магматические и постмагматические. Продуктами собственно магматического процесса являются магматические горные породы, содержащие либо концентрирующие рудные минералы. По глубине формирования выделяют: эффузивные (излившиеся на поверхность) и интрузивные (глубинные). При оценке химического, а, значит, минерального состава магматических горных пород наиболее важным является содержание кремнезема. По содержанию кремнезема породы делятся на ультраосновные (30–45 %), основные (45–53 %), средние (53–69 %), кислые (69–78 %). Породы с одновременно высоким содержанием  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$  отнесены к щелочным. Ультраосновные, основные и щелочные породы как ассоциации породообразующих минералов характеризуются отсутствием свободного кварца. Последовательность выделения минералов при кристаллизации расплава и образующиеся при этом парагенезисы соответствуют рядам Боуэна. Типичные минералы ульт-

траосновных и основных пород: оливин, пироксены, плагиоклазы, роговая обманка, рудные минералы: хромшпинелиды, платина, титаномагнетит, пентландит, пирротин, ильменит, алмаз. Типичные минералы щелочных пород: нефелин, калиевые полевые шпаты, альбит, щелочные пироксены и амфиболы, биотит, акцессорные: сфен, апатит, корунд, флюорит, рудные: магнетит, ильменит. Кислые породы (гранитоиды) характеризуются ассоциацией: кварц, полевые шпаты (плагиоклазы и калишпаты), слюды, роговая обманка. Акцессорные минералы: рутил, ильменит, циркон, турмалин. Рудные: пирит, золото, касситерит, вольфрамит и др.

Позднемагматическим является *пегматитовый* процесс. Пегматиты образуются в верхних краевых частях магматических массивов, формирующихся на больших глубинах (1,5–10 км от поверхности земли) в условиях высокого внешнего давления, способствующего удержанию летучих компонентов в магме в растворенном состоянии. Пегматиты характерны для всех видов пород, но чаще встречаются пегматиты кислых и щелочных дериватов магм. Они наблюдаются в виде жил или неправильной формы тел весьма значительных размеров, как по простиранию, так и по мощности, обычно зонального строения и характеризуются необычайной крупнозернистостью минеральных агрегатов (рис. 54).

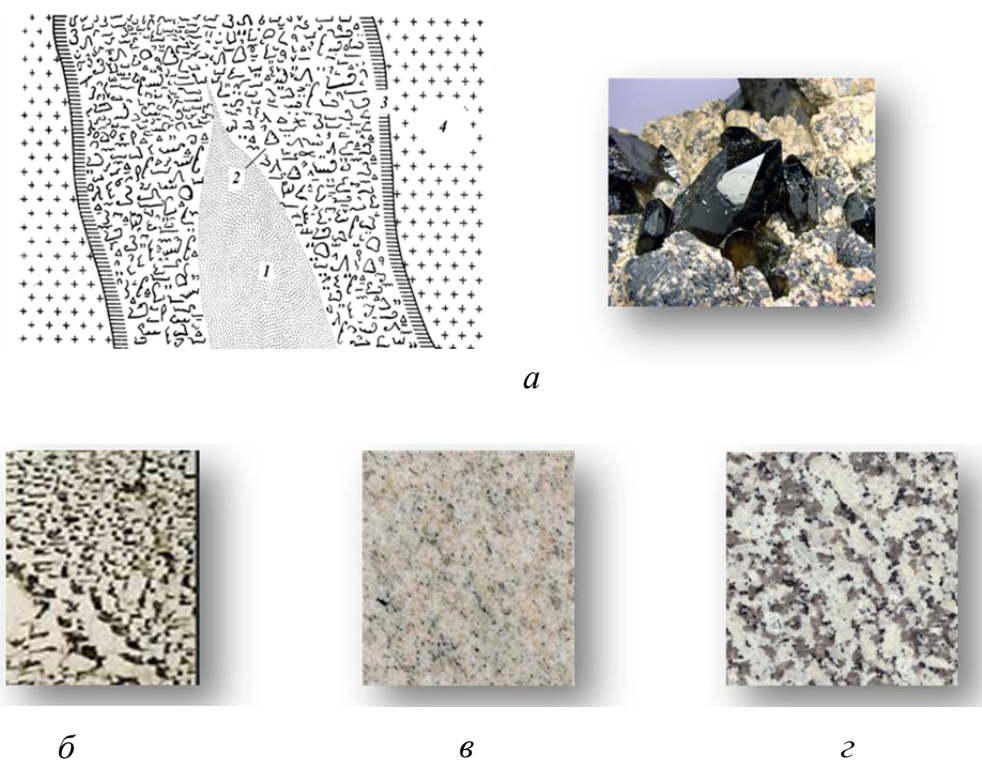


Рис. 54. Зональность простых пегматитов (по В.И. Смирнову): а – кварцевое ядро; б – письменный гранит; в – аплитовая оторочка; г – материнский гранит

По своему составу они не многим отличаются от материнских пород. Они содержат в небольших количествах такие минералы как топаз, турмалин, берилл, литиевые слюды, минералы олова, вольфрама, редких земель. Для пегматитов характерно наличие пустот с крупными друзами хорошо образованных кристаллов.

*Постмагматические процессы* (пневматолитово-гидротермальные) протекают после того, как главный процесс кристаллизации магмы в глубинном массиве в основном закончился. Эти процессы идут с участием высокотемпературных химически агрессивных гидротермальных растворов, насыщенных летучими компонентами, отделившихся от материнского интрузива. Основным способом отложения минерального вещества из гидротермальных растворов является метасоматоз – замещение исходных породообразующих минеральных ассоциаций новообразованными минеральными агрегатами. Метасоматоз осуществляется путем растворения и выноса ряда компонентов материнской породы, находящейся в твердом состоянии и образовании новых минералов с сохранением реликтов исходных. Пневматолитово-гидротермальный процесс наиболее интенсивно проявляется в интервале глубин 1–10 км и при температуре 650–620 °С. Наиболее высокотемпературные преобразования происходят на контакте магматического расплава с вмещающими проницаемыми породами. Происходит так называемое «пропаривание» летучими компонентами как краевых (апикальных) частей самого материнского интрузива, так и соприкасающихся с ним толщ вмещающих пород. Поэтому с точки зрения геологического положения такие процессы называются контактово-метасоматическими.

Формирующиеся метасоматиты весьма разнообразны, поскольку зависят от состава материнской магмы-источника летучих компонентов и температурного режима, от состава и проницаемости вмещающих пород и некоторых других факторов. Наиболее представительны в минералогическом отношении и широко проявлены в площадных масштабах контактово-метасоматические процессы скарнирования и грейзенизации. Продукты этих процессов получили соответственно название скарны и грейзены.

*Скарны* образуются в области контакта контрастных по составу силикатных пород интрузива и карбонатных вмещающих пород (известняков, доломитов и других известковистых пород). При этом и в кровле интрузива, и в боковых породах происходят химические реакции под воздействием пропитывающей парообразной фазы и гидротермальных растворов (рис. 55). Скарны образуются в интервале температур 800–200 °С на глубинах 0,5–5 км.

Выделяются экскарны (по вмещающим карбонатным породам) и эндоскарны (по алюмосиликатным породам интрузива). Минеральный состав отличается разнообразием: основа силикаты и алюмосиликаты кальция: гранаты (гроссуляр-андрадитового ряда), эпидот, пироксены (ряд диопсид-геденбергита), волластонит.

Типичными для скарнов являются шеелит, магнетит, гематит, различные сульфиды: молибденит, пирит, халькопирит, борнит, халькозин, галенит, сфалерит, а также кварц и кальцит.

В зависимости от состава вмещающих пород различают известковые, магнезиальные, и силикатные скарны. Для всех видов скарнов установлена длительная и сложная история формирования, как правило, в несколько стадий. Со скарнами связаны месторождения железа, кобальта, молибдена, свинца, цинка, золота, меди, вольфрама.

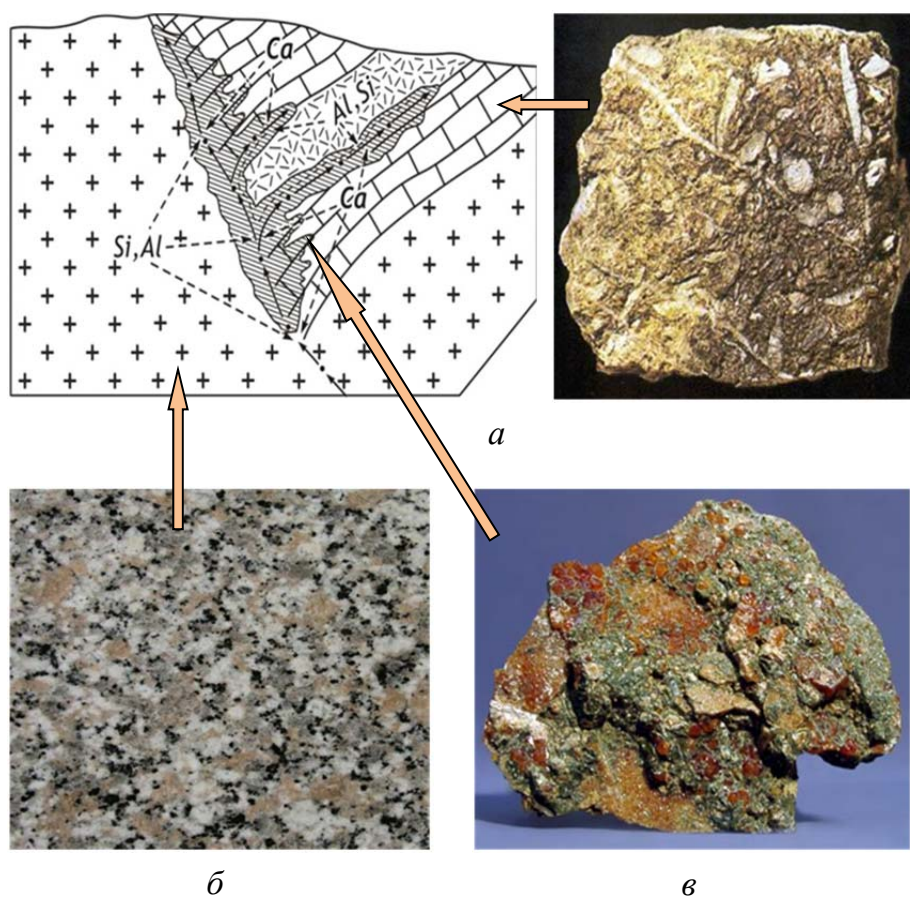
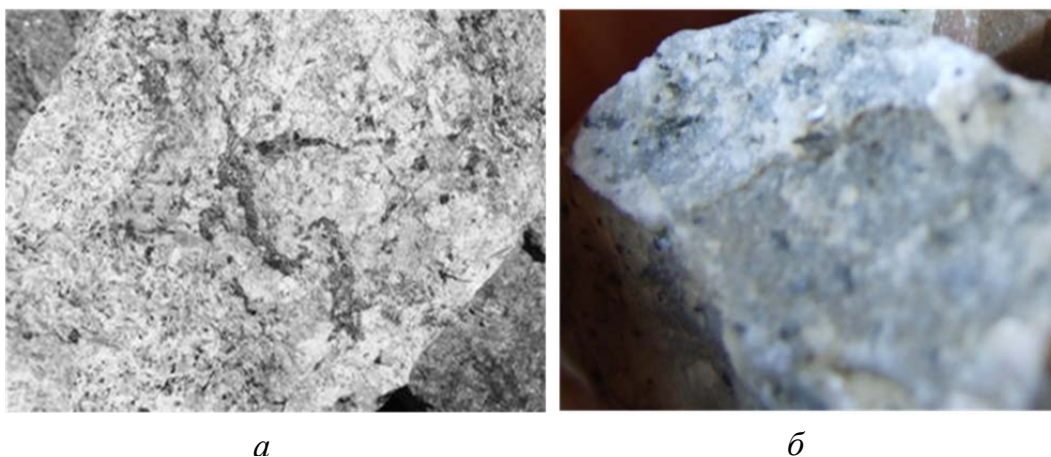


Рис. 55. Схема образования скарнов:

*а* – вмещающие карбонатные породы-известняки; *б* – граниты; *в* – скарны

К глубинным и высокотемпературным контактово-метасоматическим процессам относится процесс альбитизации материнских интрузивов. Происходит изменение гранитоидов и щелочных пород под воз-

действием высокотемпературных щелочных (существенно Na) растворов. Первичные породообразующие минералы: КШШ и плагиоклаз подвергаются замещению новообразующимся альбитом. Биотит замещается мусковитом или хлоритом. Освобождающийся кальций связывается фтором во флюорит. Калий, переходя в раствор, выносится в верхние части, но иногда, может, накапливаясь в растворе, образовать амазонит. В результате процесса образуются альбититы – лейкократовые мелкозернистые породы существенно кварц – альбитового состава, с более крупными выделениями микроклина-амазонита и слюд (рис. 56). Типоморфными металлами альбититов являются цирконий, ниобий, торий, редкие земли, в виде соответствующих минералов.



*Рис. 56. Альбититы Приазовья: а – в обнажении; б – обр. породы*

*Грейзенизация* – процесс постмагматического изменения материнских интрузивов и вмещающих пород под воздействием пневматолито-во-гидротермальных растворов, насыщенных калием. Создавая кислую среду, они обеспечивают глубокую проработку пород. При этом наиболее неустойчивыми оказываются биотит и полевые шпаты, которые превращаются в кварц-мусковитовый агрегат.

Типоморфные металлы грейзенов бериллий, литий, олово, вольфрам. Грейзенизация характеризуется интервалом температур от 480 до 240 °С и часто генетически связана с процессом альбитизации как более низкотемпературная и более кислотная стадия метасоматоза (рис. 57). Процесс обычно протекает на глубине 1–4 км.

Грейзены проявляются в виде штокверков – сети невыдержанных кварцевых прожилков, окруженных грейзенизированной породой. Основные минералы: кварц и мусковит, часто отмечается флюорит, акцессорные: турмалин, берилл, топаз, из рудных молибденит, вольфрамит, касситерит.

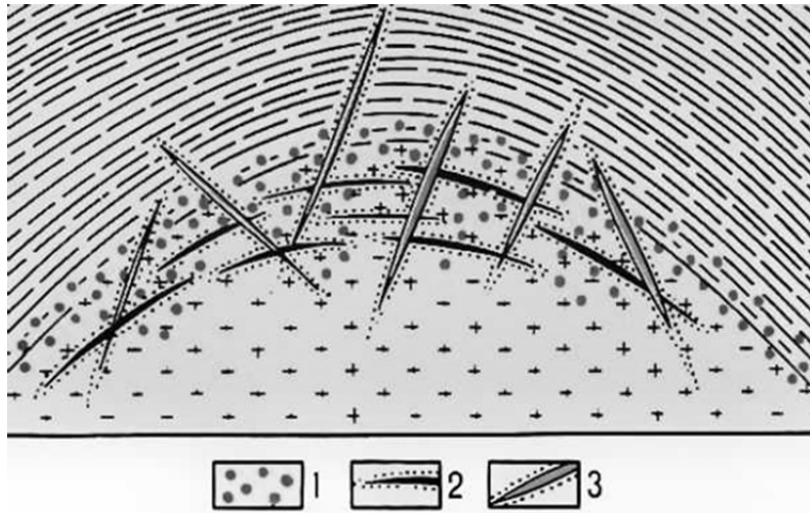


Рис. 57. Схема процесса грейзенизации (по В.И. Смирнову): 1 – альбититы; 2 – грейзены; 3 – жильные грейзены поздней стадии

Гидротермальные процессы развиваются в глубинных условиях на некотором удалении от непосредственного магматического очага. Остаточные парообразные растворы используют для своего продвижения систему трещин, возникающих при внедрении магмы во вмещающие породы. Пары постепенно охлаждаются, сжижаются, превращаясь в горячие водные растворы – гидротермы.

Наиболее благоприятные условия для проявления гидротермальных процессов создаются на средних глубинах (3–4 км от поверхности Земли). Главная масса гидротермальных образований пространственно и генетически связана с интрузивами кислых пород (гранитов, гранодиоритов). Циркуляция глубинных (ювенильных) растворов в некоторых случаях достигает поверхности земли.

Известный факт, что в районах проявления вулканизма действуют горячие минерализованные источники. Кроме того, в формировании гидротермальных растворов важную роль играют и поверхностные воды, просачивающиеся на глубину до 2–2,5 км. Постепенно нагреваясь и обогащаясь компонентами вмещающих пород, они по существу приобретают характер ювенильных вод. Возможны гидротермальные растворы и смешанного происхождения (рис. 58).

Температура подобных растворов 370–400° С. Они циркулируют при давлении от нескольких тысяч атмосфер на глубине до 1 атм. на поверхности земли. Металлогенные элементы, присутствуют в растворах в виде комплексных соединений. Важнейшей причиной гидротермального минералообразования является понижение температуры, приводящее к снижению устойчивости комплексных соединений. Происходит их распад и отложение минералов. Понижение давления влияет на измене-



ние химической обстановки среды минералообразования, на химическое взаимодействие компонентов.

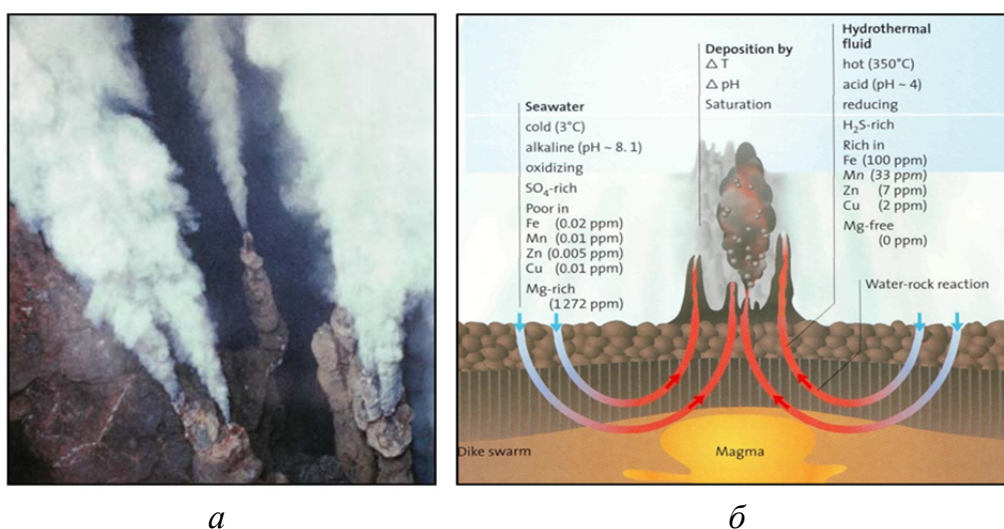


Рис. 58. Современное гидротермальное минералообразование на океаническом дне («черные курильщики») (а); схема смешения метеорных и ювенильных вод (б)

По преобладанию тех или иных минеральных ассоциаций – температурных индикаторов выделяют:

1. Высокотемпературные образования 500–300 °С;
2. Среднетемпературные 300–200 °С;
3. Низкотемпературные ниже 200 °С.

Деление достаточно условное, кроме того, разделение гидротермальных образований ведется по характеру их связи с магматическим очагом. По этому признаку выделяют:

1. Плутоногенный тип. Глубина формирования 1–5 км. Кварцевые жилы возникают при участии гидротермальных растворов за счет ювенильных вод, которые содержат компоненты – минерализаторы из самого магматического расплава и лишь частично компоненты, выщелаченные из вмещающих горных пород. Гидротермалиты характеризуются развитием кварцевых, сульфидных, карбонатных, баритовых, флюоритовых минеральных ассоциаций. Жильные образования сопровождаются ореолами метасоматически измененных вмещающих пород. Гидротермальные образования характеризуются поликомпонентным составом руд. Они формируют основные месторождения олова, вольфрама, молибдена, урана, золота, серебра, висмута, никеля, кобальта, свинца, цинка и др.

2. Вулканогенный тип связан с близповерхностным и наземным вулканизмом. Образования часто приурочены к жерлам вулканов и возникают при участии гидротермальных растворов, в которых существен-

ную роль играют поверхностные (метеорные воды), резкий перепад температур (от 700 до 50 °С) и стремительно возрастающий потенциал кислорода. Малоглубинные (1,5 км) гидротермальные образования, тем не менее, характеризуются большим разнообразием минеральных ассоциаций. Типичными являются: полиметаллические с золотом и серебром, сурьмяно – ртутная (киноварь, антимонит, флюорит), самородная медь, исландский шпат, сера как отложения фуमारол и сольфатар (рис. 59).



Рис. 59. Фумарольные отложения самородной серы, о. Итуруп

3. Телетермальный тип. Гидротермальные минеральные образования не обнаруживают видимой связи с магматическим очагом. Обычно проявлены на площадях развития осадочных пород, поэтому характерна пластовая форма рудных тел (сульфидизированные толщи). Единого мнения об условиях образования данного типа проявлений нет до сих пор. Отложение минералов происходит на небольших глубинах. Минеральные ассоциации простые и средне-низкотемпературные: борнит-халькопирит – халькозиновая (медистые песчаники), антимонит-киноварная (ртуть-мышьяковая), галенит-сфалеритовая (свинец-цинковая) обычно с кварцем, карбонатами и флюоритом.

Формы минеральных тел зависят от формы выполняемых пустот и состава окружающих горных пород, в которых происходит циркуляция гидротермальных растворов. В случаях заполнения трещин, образуются *жилы*, при заполнении мельчайших пустот и пор образуются *вкрапленники*. Если встречаются химически легко реагирующие с растворами породы (известняки), тогда образуются *залежи*. В случае проникновения растворов в большие полости, вследствие резкого уменьшения давления, происходит массовое испарение воды, резкое пересыщение растворов и выпадение коллоидных масс, при затвердевании которых формируются колломорфные агрегаты. Признаки таких образований часто видны на стенках жил, секретий. Жилы в подавляющем большинстве выполнены массами жильного кварца с включениями разнообразных рудных минералов.

Гидротермальные растворы, циркулируя в горных породах различного состава, вступают с ними во взаимодействие. Изменения, происходящие в породах, сводятся к следующим процессам:

*Серпентинизация.* Породы ультраосновного состава с повышенным содержанием магния и железа, состоят в основном из оливина и пироксена, которые подвергаются замещению серпентином. Новообразованные породы называются серпентинитами.

*Лиственитизация.* Породы ультраосновного и основного состава с повышенным содержанием магния под действием гидротермальных растворов преобразуются в листвениты: ассоциацию магнезиально-железистых карбонатов (магнезит, брайнерит), кварца, слюды (серицит, фуксит).

*Пропиллитизация.* Вторичные изменения чаще всего эффузивных пород основного и среднего состава. Процесс сводится к замещению пироксенов и амфиболов исходных пород агрегатом актинолита, эпидота, хлорита и карбонатов. Полевые шпаты попутно замещаются альбитом и адуляром.

*Эпидотизация.* Породы основного и среднего состава с породообразующими кальций – содержащими силикатами (плагиоклазы, пироксены, амфиболы) замещаются эпидотом. Образуются породы – пидозиты.

*Хлоритизация.* Породы основного и среднего состава с магнезиально-железистыми силикатами (амфиболы, пироксены, биотит) замещаются хлоритом с попутным образованием кварца, серицита и карбонатов. Отмечается также образование кварц-хлоритовых жил.

*Березитизация.* Породы среднего и кислого состава (гранитоиды) в результате гидротермальных изменений превращаются в березиты – ассоциацию кварца, серицита, доломита (анкерита) и пирита.

*Вторичные кварциты* образуются при гидротермальном изменении кислых реже средних и основных эффузивных пород. Представляют собой существенно кварцевые породы, обогащенные минералами алюминия: корундом, диаспором, андалузитом, каолинитом и др.

Кроме того отмечаются процессы каолинизации, окремнения, серицитизации и другие как вторичные процессы изменения ранее образованных минеральных ассоциаций под действием химически активных гидротермальных растворов.

## **Экзогенные процессы минералообразования**

Процессы минералообразования, происходящие на поверхности земной коры или в ее верхних горизонтах. В данных условиях температура и давление не имеют существенного значения. Активными факторами являются водные растворы, газообразные компоненты атмосферы,

энергия солнца, деятельность растительных и животных организмов, объединяющиеся в мощный химический процесс *выветривания*. Он приводит к физическому и химическому разложению всего того, что было создано эндогенными процессами, к образованию новых продуктов, устойчивых в данных условиях. Во взаимосвязи с процессами разрушения и выветривания идут процессы переноса и переотложения. Агентами переноса, как правило, являются водные потоки различного происхождения, ветер, ледники, приводящие к отложению продуктов переноса в водных бассейнах, где протекают своеобразные процессы минералообразования, приводящие к отложению осадков в виде слоев, пластов на дне водоемов. Этот процесс называется *осадочным*.

Экзогенные минеральные образования можно разделить на 3 группы: остаточные, инфильтрационные и осадочные.

*Остаточные* характеризуются тем, что возникающие продукты выветривания остаются на месте разрушения исходных пород. При выветривании магматических и метаморфических горных пород остаточные образования представлены *корами выветривания*, которые перекрывают разрушаемые породы. По характеру распространения коры выветривания бывают площадными и линейными (зоны дробления, линейные тектонические нарушения, контакты разнородны по составу горных пород). Выделяют также типы кор выветривания по составу формирующегося материала.

Коры выветривания *латеритного типа* распространены в местностях с жарким климатом, с большими колебаниями суточных температур, с обилием растительных и животных организмов, способствующих интенсификации процессов выветривания. Примером латеритного выветривания являются месторождения бокситов, образованные за счет магматических алюмосиликатных пород. Новообразованные минералы представляют собой гидроксиды алюминия с небольшой примесью железа.

Кора *марганцевого типа* образуется в условиях жаркого и влажного климата при выветривании осадочных марганецсодержащих карбонатных пород. Новообразованные минеральные ассоциации представлены разнообразными оксидами и гидроксидами марганца.

Кора выветривания *глинисто-каолинового* типа возникает при выветривании различных пород чаще кислого состава (гранитоидов) в условиях умеренного климата (рис. 60). Состав новообразованных ассоциаций: глинистые минералы с присутствием кварца и гидрослюд.

Остаточные образования, появляющиеся при выветривании жильных месторождений, носят название *зоны окисления*. При воздействии поверхностных растворов (метеорных вод) богатых кислородом на сульфиды, последние легко окисляются и переходят в сульфатные соедине-

ния. Они хорошо растворимы в воде и легко выносятся из зоны окисления. Наряду с сульфатами образуются из коллоидных растворов скрытокристаллический или аморфный кремнезем (опал, халцедон), образующий кремнистый скелет зоны окисления. В нижних частях зоны окисления появляются новообразованные минералы – кислородные соединения металлов (оксиды, гидроксиды), самородные металлы (медь, золото). Поверхностные новообразования носят названия железных, марганцевых или медных шляп. Существуют также гипсовые шляпы, образующиеся при выветривании осадочных месторождений каменной соли.



Рис. 60. Каолиновые коры выветривания в окрестностях г. Томска

*Инфильтрационные* образуются в результате циркуляции водных растворов в толще пород и руд ниже уровня грунтовых и артезианских вод. Например, в медносульфидных месторождениях растворы, обогащенные сульфатами металлов из верхних горизонтов, вступают во взаимодействие с первичными сульфидами нижних горизонтов и в таком случае образуются зоны вторичного сульфидного обогащения, с значительно повышенным содержанием металлов. Инфильтрационные образования формируют повышенные концентрации минеральных фаз железа, меди, марганца, урана.

*Осадочные* образования характерны для водных сред: рек, озер, морей, океанов. В морских бассейнах осадочные процессы в течение многих геологических эпох привели к образованию огромной мощности толщ осадочных горных пород. Среди осадочных образований различают механические и химические осадки.

В процессе накопления *механических осадков* не происходит образования новых минералов, идет переотложение водными потоками химически стойких минералов и обломков горных пород, перераспределение их по удельному весу. Примером являются пески, песчаники, глины, галечники, гравий, *россыпи* ценных минералов: золота, платины, алмазов, магнетита, рутила, циркона и т. д. (рис. 61).



Рис. 61. Песчаные наносы в русле реки (а); циркон-гранат-ильменитовые пески (б)

*Химические осадки* возникают, главным образом, в замкнутых бассейнах. Выпадение осадков происходит либо путем кристаллизации пересыщенных солями вод, либо путем осаждения в виде гелей коллоидных растворов, либо путем накопления продуктов жизнедеятельности органического мира и самих органических остатков. Примеры: мощные толщи карбонатных отложений древних морей (известняки, доломиты), сульфатные, хлоридные соли (рис. 62), конкреции железа и марганца, кремния. Главная особенность – сложность и непостоянство химического состава минеральных образований, обилие газовой-жидких включений и разнообразных адсорбированных элементов-примесей. Агрегаты большей частью и мелко-тонкозернистые или пелитоморфные.



Рис. 62. Соляные отложения оз. Баскунчак (а); схема-модель соляного купола месторождения каменной соли (б)

*Биогенные осадки* – диатомиты, ракушечники, фосфориты, каолиниты, ископаемые угли, горючие сланцы, нефти и т. д. При последующем преобразовании одни из них превращаются в неорганические минеральные ассоциации, другие так и остаются органическими соединениями. Типоморфные особенности осадочных образований детально рассматриваются в специальных руководствах М.С. Швецова, Л.Б. Рухина и др.

Образующиеся минеральные осадки вместе с принесенными глинистыми частицами, мелким обломочным материалом и остатками отмерших организмов отлагаются на дне морских водоемов в виде прослоев или мощных пластов. С течением времени происходит их уплотнение и постепенно начинаются процессы глубинного преобразования.

## **Метаморфогенные процессы минералообразования**

Эндогенные и экзогенные образования со временем претерпевают изменения, которые происходят, как правило, на больших площадях и значительных глубинах земной коры в условиях повышенных температур ( $T$ ), давления ( $P$ ) и участия химически активных растворов ( $X$ ). В результате подобных преобразований формируются разнообразные метаморфогенные (метаморфические) ассоциации и минеральные парагенезиса, слагающие толщи разнообразных метаморфических пород и формирующие метаморфогенные месторождения полезных ископаемых. С ними связаны такие полезные ископаемые как железные марганцевые руды, глиноземистое сырье, абразивное сырье (гранаты, наждаки), графит, мрамор, яшмы и т. д.

По геологическим условиям и генетическим факторам данные образования относятся к эндогенным, но рассматриваются всегда последними, поскольку объектами преобразований являются и экзогенные минеральные ассоциации (породы, месторождения).

Главными факторами, как уже было сказано, являются температура, давление, состав и концентрация компонентов (минерализаторов) в циркулирующих растворах. Не маловажную роль играет и состав преобразуемых (метаморфизируемых) пород и руд.

*Температура* обусловлена геотермическим градиентом – в среднем  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  на  $100\text{ м}$  глубины, теплотой радиоактивного распада и теплотой глубинных расплавленных магматических масс.

*Давление* обусловлено нагрузкой вышележащих толщ (литостатическое или гидростатическое). Градиент давления –  $27,5\text{ МПа}$  при углублении на каждый км. Выделяют также динамическое боковое давление (направленное или стресс), обусловленное складкообразованием и давлением газовых растворов. Оно может меняться в пределах  $200\text{--}700\text{ МПа}$ .

Состав и минерализация *химически-активных растворов* зависит, в первую очередь, от состава магматического расплава, обогащенного летучими компонентами. Основная роль в химически – активных растворах принадлежит воде различного генезиса (ювенильная, метеорная, смешанная). Вода понижает температуру минералообразования и ускоряет ход реакций обмена, увеличивает кристаллизационную способ-

ность минералов, может растворять минералы и может обеспечить их избирательный вынос и переотложение. В составе подобных растворов всегда содержатся углекислота, HF,  $V(OH)_2$ ,  $H_2S$  и другие активные компоненты. Режим воды зависит от температуры, а углекислоты – от давления, т. е. глубины. Особенно это важно для углеродсодержащих (карбонатных) минералов. С глубиной растет разложение карбонатов, увеличение углекислотности растворов, что приводит к увеличению парциального давления и, в конечном счете, карбонатные минеральные ассоциации постепенно вытесняются силикатами.

Сущность метаморфизма заключается в том, что агрегаты минералов эндогенного и экзогенного происхождения, оказавшись в глубинах земной коры, в изменяющейся физико-химической обстановке, становятся неустойчивыми. Под действием выше указанных факторов метаморфизма происходит их преобразование в агрегаты других минералов устойчивых в новых условиях. Например, гидроксиды переходят в оксиды, фосфориты – в апатит, бокситы (гидроксиды Al) – в корунд, органическое вещество – в графит, появляются минералы с большей плотностью.

Обычно прогрессивный (вызванный повышением T и P) метаморфизм проходит в две стадии. На первой стадии *регионального* (площадного, динамотермального) метаморфизма происходит медленная перекристаллизация (без изменения химического состава) мелкозернистых ранее образованных минеральных агрегатов в крупнозернистые при наличии поровых растворов с  $H_2O$  и  $CO_2$ . При этом растворы находятся в химическом равновесии с изменяемыми минеральными агрегатами (породами), которые сохраняют *твердое* состояние. На второй стадии при появлении гидротермальных растворов, обогащенных минерализаторами, перекристаллизация сопровождается *метасоматическим* образованием новых минералов и изменением химического состава первичных пород. При длительном и более глубинном проявлении региональный метаморфизм может переходить в ультраметаморфизм, когда исходные породы испытывают частичное переплавление (анатексис), а затем и полное расплавление (палингенез). Совокупность глубинных процессов метаморфизма может вызвать появление локальных (коровых) очагов гранитоидных расплавов, при затвердевании которых вновь повторится процесс магматического минералообразования в соответствии с кристаллизационными рядами Р. Боуэна.

Итак, главными способами образования минералов при метаморфизме являются *перекристаллизация* или кристаллобластез (от греч. «бластос» – росток, зародыш) и *метасоматоз*.



Особенности минерального состава метаморфогенных парагенезисов определяются тем, что в составе новообразований можно выделить 3 группы породообразующих (главных) минералов:

- минералы, играющие роль породообразующих как в магматических, так и в метаморфических образованиях: КПШ, плагиоклазы, кварц, оливин, пироксены, амфиболы, слюды;
- минералы, являющиеся в магматических образованиях вторичными или аксессуарными, в метаморфических – главными: серпентин, хлориты, карбонаты, эпидот-цоизиты, гранаты;
- минералы свойственные лишь метаморфическим образованиям: андалузит, ставролит, дистен, кордиерит, волластонит, силлиманит и др.

Зерна минералов в метаморфических породах называются *кристаллобластами* (рис. 63). Для них, как правило, не характерна огранка, так как они растут одновременно с соседними индивидами. Иногда на фоне мелкозернистой основной массы отмечаются более крупные выделения минералов, которые называют *порфиробластами*. Различная степень идиоморфизма кристаллобластов объясняется не последовательностью их выделения, различной кристаллизационной способностью и разной скоростью роста.

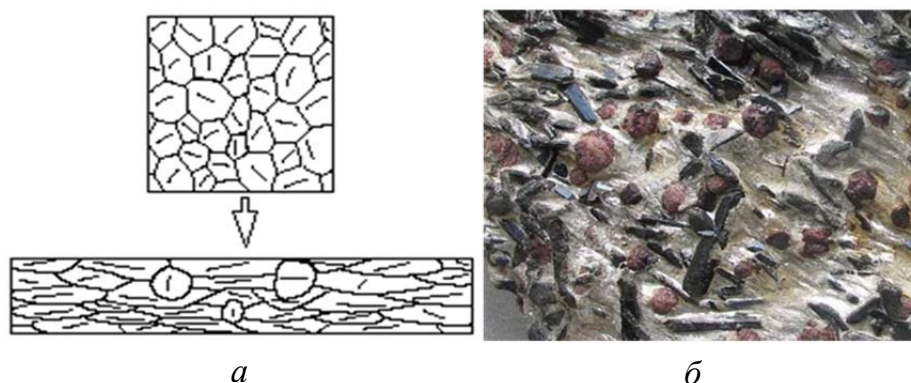


Рис. 63. Схема формирования кристаллобласт(а); кристаллобласты альмандина и ставролита в кристаллическом сланце (б)

По силе кристаллизации основные породообразующие минералы могут быть расположены в кристаллобластический ряд. В этом ряду каждый предыдущий минерал характеризуется большей силой кристаллизации, чем последующий. Впервые кристаллобластические ряды были установлены Ф. Бекке, затем они были расширены Ф. Тернером, и уточнены Филпотсом (1990).

- магнетит, рутил, сфен, пирит;
- силлиманит, кианит, гранат, ставролит, турмалин;
- андалузит, эпидот, цоизит, форстерит, лавсонит;

- амфибол, пироксен, волластонит;
- слюда, хлорит, тальк, пренит, стильпномелан;
- кальцит, доломит, везувиан;
- кордиерит, полевой шпат, скаполит;
- кварц.

Сверху вниз прослеживается изменение структуры минералов, снижение удельного веса и увеличение молекулярных объемов минералов.

В заключение сделаем общие замечания о морфологических особенностях метаморфических минералов:

- типоморфными обликами этих минералов являются уплощенный (таблитчатый, пластинчатый, листоватый, чешуйчатый) и удлиненный (призматический, столбчатый, игольчатый, вололкнустый). Они обусловлены преимущественным ростом минеральных индивидов, в направлениях перпендикулярных к давлению (рис. 64).



*а*

*б*

*Рис. 64. кристаллические сланцы: а – актинолитовый; б – турмалиновый*

- скорость роста в направлении максимального сжатия оказывается меньше, чем в направлениях максимального растяжения. Перекристаллизация в обстановке неравномерного давления приводит к ориентированному расположению не только листоватых или вытянутых кристаллов, но и минеральных зерен по структуре своей имеющих изометричную форму (оливин, кварц).

- при метаморфизме образуются минералы с наименьшим объемом и повышенной плотностью – с более компактной кристаллической решеткой.

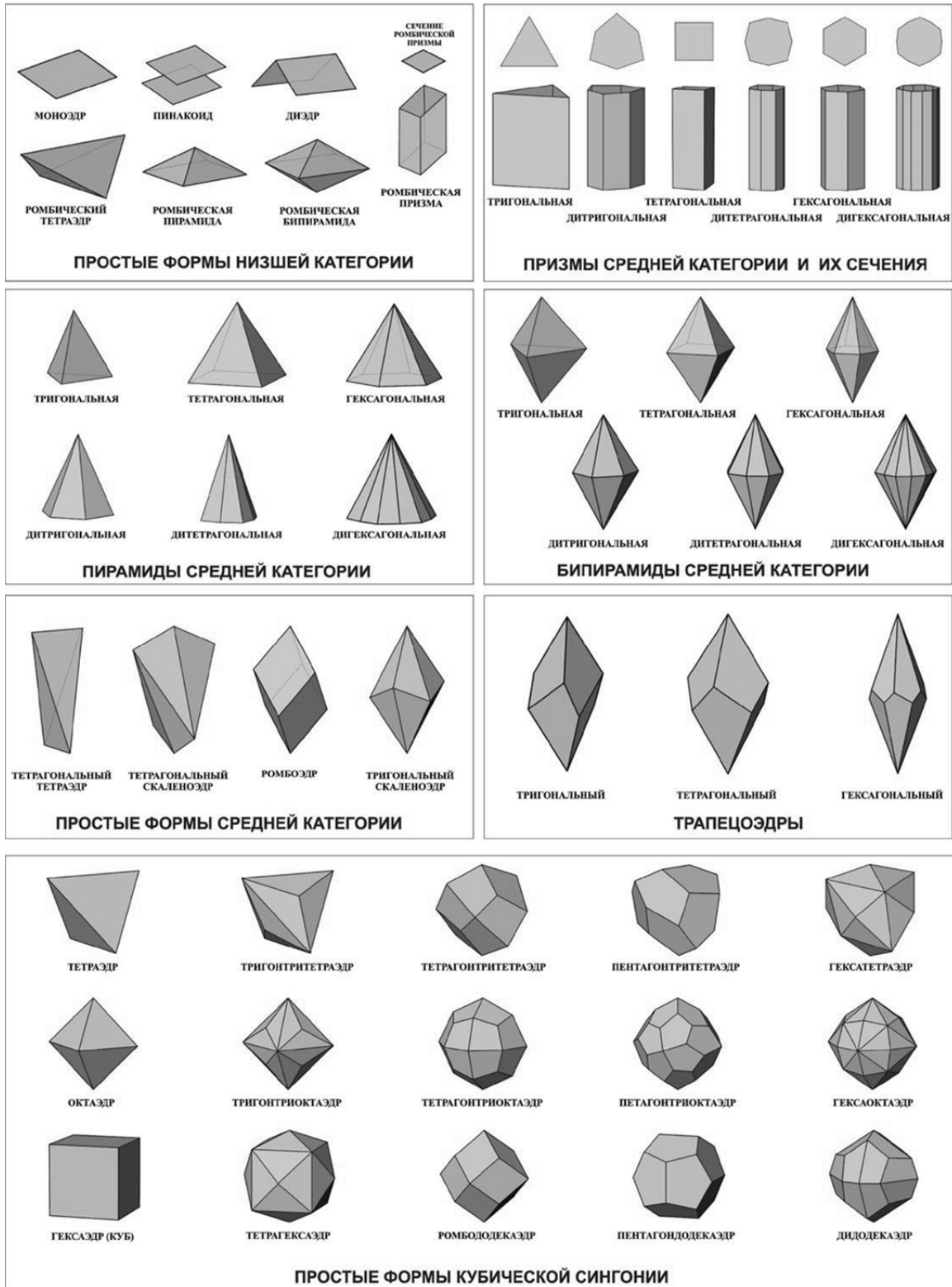
## Послесловие

В настоящее время все чаще употребляются термины-наноминералогия, биоминералогия – науки, зародившиеся на новых рубежах исследований. Новые направления старой, если не сказать древней, науки минералогии. Минерал – это необыкновенный объект природы изучением и исследованием которого занимаются не только минералоги, петрографы, литологи, но и медики, фармацевты, физиологи, а также физики, химики, технологи и прочие специалисты – перечисление может быть бесконечным. Поэтому минералогию следует воспринимать не как отдельную науку, а как комплекс наук о минералах.

Необходимо упомянуть и о том, что выдающимся достижением отечественной минералогии является создание и развитие ее генетического направления, оформившегося в самостоятельный раздел – генетическую минералогию. Генетическая минералогия ставит своей задачей выяснение происхождения минералов и их ассоциаций необходимого для установления генезиса пород и месторождений полезных ископаемых. Что определяет, в свою очередь, рациональное направление геологоразведочных работ, выявление новых видов минерального сырья и разработки технологических схем его обогащения. Учения о парагенезисе и типоморфизме минералов являются теоретической основой поисковой минералогии, возникшей на стыке минералогии и поисково-оценочного дела. Их задача – разработка минералогических поисково-оценочных критериев и методов поисков полезных ископаемых на различных стадиях геолого-разведочных работ. Таким образом, без знания минералогии невозможно решать теоретические и прикладные проблемы геологии и народного хозяйства в целом, базирующегося на природном сырье. Невозможно полноценно оберегать среду обитания человека и синтезировать новые материалы, не зная основ минералогии.

Данные конспекты не претендуют на всеохватность гигантской дисциплины минералогии. За детальными сведениями следует обращаться к многочисленным учебникам, справочникам, энциклопедиям и различным техническим руководствам. Курс минералогии, особенно его описательная часть, требует усидчивости, многочасовых занятий с эталонными и рабочими коллекциями, посещения минералогических музеев. Только тогда придет умение диагностировать минерал и его ассоциацию, понимать и выявлять его генетические признаки. Осознание, понимание и любовь к минералогии приходит, как правило, с годами. И это тоже ее особенность!

47 простых форм кристаллов



## Список литературы

### *Основная литература (учебная)*

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии / Бетехтин А.Г. – М.: Изд-во КДУ, 2007
2. Годовиков А.А. Введение в минералогию / Годовиков А.А. – Новосибирск: СО Наука, 1973.
3. Булах А.Г. Общая минералогия / А.Г. Булах, В.Г. Кривовичев, А.А. Золотарев. – М.: ИЦ Академия, 2008.
4. Лазаренко Е.К. Курс минералогии / Лазаренко Е.К. – М.: Высшая школа, 1971.
5. Попов Г.М. Кристаллография / Г.М.Попов, И.И. Шафрановский. – М.: Высшая школа, 1972.
6. Станкеев Е.А. Генетическая минералогия / Станкеев Е.А. – М.: Недра, 1986.

### *Дополнительная (учебная)*

1. Барабанов В.Ф. Генетическая минералогия / Барабанов В.Ф. – СПб.: Недра, 1977.
2. Берри Л. Минералогия. Теоретические основы. Описание минералов. Диагностические таблицы / Л. Берри [ и др.]. – М.: Мир, 1987.
3. Годовиков А.А. Минералогия / Годовиков А.А. – М.: Недра, 1983.
4. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Индивиды / Д.П. Григорьев, А.Г. Жабин. – М.: Наука, 1975.
5. Костов И. Минералогия / Костов И. – М.: Мир, 2000.
6. Ресурсы интернета // [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)
7. Ресурсы интернета [www.mindat.org](http://www.mindat.org)
8. Ресурсы интернета [www.lapis.de](http://www.lapis.de)
9. Ресурсы интернета [www.rocksandminerals.org](http://www.rocksandminerals.org)
10. Ресурсы интернета [www.minrec.org](http://www.minrec.org)
11. Ресурсы интернета [www.minbook.com](http://www.minbook.com)
12. Ресурсы интернета [www.mineralnews.com](http://www.mineralnews.com)
13. Ресурсы интернета [www.mineralien-welt.de](http://www.mineralien-welt.de)
14. Ресурсы интернета [www.minerapole.com](http://www.minerapole.com)

## Оглавление

Предмет минералогии .....	3
Конституция минералов .....	4
Понятие о симметрии.....	7
Формы природных кристаллов .....	11
Роль, место, объект исследования минералогии.....	17
Основные этапы развития минералогии .....	20
Значение минералогии .....	23
Химические свойства минералов. Формулы .....	27
Химический анализ минералов. Простейшие методы пересчета химического Анализа на кристаллохимические формулы .....	28
Типы воды и ее роль в составе минералов .....	30
Изоморфизм. Изоморфные смеси.....	31
Коллоидные системы и их роль в процессах минералообразования .....	33
Полиморфизм.....	36
Физические свойства минералов .....	40
Морфологические особенности минералов.....	40
Оптические свойства минералов .....	45
Механические свойства минералов.....	51
Прочие свойства минералов .....	55
Генезис минералов .....	57
Эндогенные процессы минералообразования .....	58
Экзогенные процессы минералообразования.....	67
Метаморфогенные процессы минералообразования.....	71
Послесловие .....	75
Приложение .....	76
Список литературы .....	77

Учебное издание

МАРТЫНОВА Татьяна Евгеньевна

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ОБЩЕЙ МИНЕРАЛОГИИ**

Учебное пособие

**Издано в авторской редакции**


Научный редактор  
*доктор геолого-минералогических наук,  
профессор А.И. Чернышов*

Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*  
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 20.11.2013. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 4,59. Уч.-изд. л. 4,16.  
Заказ 1296-13. Тираж 100 экз.

---

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