

Ч А С Т Ь I

МИНЕРАЛОГИЯ

Минералы - это природные химические соединения, состоящие из атомов нескольких или, реже, одного химического элемента. Большая часть минералов представлена твердыми телами, хотя среди природных химических соединений имеются жидкие и газообразные. Наука о составе, строении, свойствах и происхождении минералов называется *минералогией*.

Изучение минералов является одной из древних отраслей естествознания. Еще в отдаленном прошлом человеку необходимо было уметь распознавать и находить минералы для использования их в качестве орудий, а позже - для выплавления металлов. Само слово «минерал» имеет латинский корень «минера», т.е. руда.

Среди твердых минералов преобладают кристаллические образования. Поэтому, прежде чем перейти к систематическому обзору минералов, необходимо познакомиться с некоторыми сведениями из области кристаллографии.

Глава I. СВЕДЕНИЯ ИЗ КРИСТАЛЛОГРАФИИ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ЕГО СТРОЕНИЕ

Твердые вещества могут быть аморфными или кристаллическими. Для аморфного вещества характерно беспорядочное расположение слагающих его материальных частиц - атомов, комплексных ионов или молекул. В кристаллическом веществе материальные частицы расположены упорядоченно.

Закономерности внутреннего строения кристаллического вещества проявляются в его внешней правильной форме. *Кристаллом* называется кристаллическое вещество, имеющее форму естественного многогранника.

Таким образом, основной особенностью кристаллического вещества является упорядоченное расположение материальных частиц, образующих это вещество. Долгое время не знали, что это за частицы. Предполагали, что кристаллы состоят из мельчайших молекул-кристаллов, которые располагаются особыми плоскими сетками, образующими пространственную решетку кристалла. Исходя из этих представлений, математики и кристаллографы блестяще разработали теорию кристаллического строения вещества. Однако непосредственно измерить эту пространственную решетку, установить действительное расположение атомов в кристаллическом веществе удалось лишь после открытия В.К.Рентгеном (1895)¹ X-лучей.

Длина волн рентгеновских лучей близка межплоскостным расстоянием кристаллической решетки. Это позволили М.Лауэ (1912) впервые использовать для исследования кристаллического вещества рентгеновские лучи и изучить кристаллическое строение каменной соли. В дальнейшем применение рентгеноструктурного анализа достигло высокого совершенства и сейчас является одним из важнейших способов изучения кристаллического вещества.

Кристаллы, состоящие из молекул, не играют существенной роли в строении земной коры. Поэтому рассмотрим связь между атомами (ионами). У атома на внешнем энергетическом уровне может быть от одного до восьми электронов. Когда на внешнем уровне находится предельно возможное количество электронов, то этот уровень очень устойчив. Такое положение у атомов инертных газов. Атомы всех других элементов имеют незавершенные энергетические уровни и стремятся к их завершению. Это и осуществляется при образовании химической связи между атомами. Известно несколько типов связи. Для минералов, из которых состоит земная кора, особо важное значение имеют ионная и ковалентная связь.

¹ Здесь и дальше год в скобках после имени исследователя обозначает год опубликования работы.

При сильном сближении атомов их электронные оболочки перекрываются. В этом случае электроны находятся в сфере воздействия обоих атомов. На участке взаимного наложения между центрами атомов создается двух-электронное облако с увеличенной плотностью отрицательного заряда. Это способствует росту сил притяжения между ядрами и двойным облаком. Такая связь атомов, осуществляемая электронными парами, называется атомной или ковалентной. Химическая связь может также создаваться в результате передачи электронов от одного атома к другому с образованием противоположно заряженных атомов (ионов). Эта связь называется ионной. В минералах распространены различные сложные комбинации ионной и ковалентной связи.

Итак, структура кристаллического вещества образуется в результате взаимодействия атомов, слагающих это вещество. При этом атомы располагаются на определенных расстояниях друг от друга.

Вокруг каждого атома имеется определенная «сфера действия», внутри которой другой атом не может проникнуть. Радиус этой сферы называют атомным или, если дается характеристика заряженного атома (иона), ионным. Величина радиуса очень мала и измеряется нанометрами (нм) - миллиардными долями метра (10^{-9}) или ангстремами (Å) - десятными долями нанометра (10^{-10} м).

Атомные радиусы химических элементов заметно различаются между собой. Величина ионного радиуса отличается от атомного. На величину ионного радиуса оказывают влияние наружные электроны. Отрицательно заряженные ионы (т.е. имеющие избыточные электроны на внешней орбите) имеют больший радиус, чем положительно заряженные. Приведем величины ионных радиусов некоторых химических элементов.

Величина ионных радиусов, в Å

$$S^{2-} = 1,82$$

$$Cl^{1-} = 1,81$$

$$K^{1+} = 1,33$$

$$Mg^{2+} = 0,74$$

$S^{6+} = 0,29$	$O^{2-} = 1,36$	$Ca^{2+} = 1,04$	$Al^{3+} = 0,57$
$Fe^{2+} = 0,80$		$Na^{1+} = 0,98$	$Si^{4+} = 0,39$
$Fe^{3+} = 0,67$			

Для катионов с переменной валентностью величина ионного радиуса уменьшается с возрастанием валентности. Так, радиус иона двухвалентного железа - $0,80 \text{ \AA}$, трехвалентного - $0,67 \text{ \AA}$.

Однако в результате энергичного взаимодействия ионов величина их радиусов может несколько уменьшаться. В этом случае происходят деформация «сфер действия», поляризация ионов (рис.3).

Устойчивость кристаллохимических структур зависит от размеров ионных радиусов. Структура будет устойчивой, если сфера действия катиона как бы соприкасается, контактирует со сферами анионов. Если же сферы анионов «сомкнуты», а имеющееся между ними пространство значительно меньше или, наоборот, превышает сферу действия катионов, то такая структура будет неустойчивой.

Условно представляя сферы действия ионов в виде шаров с размерами, пропорциональными ионными радиусами, мы можем моделировать различные кристаллохимические структуры. Количество противоположно заряженных ионов, приходящееся на один ион в кристаллической структуре, называют **к о о р д и н а ц и о н н ы м ч и с л о м**.

Пространство между четырьмя соприкасающимися шарами меньше того, которое образуется между шестью или восемью шарами. Поэтому если радиус катиона значительно меньше радиуса аниона, то координационное число будет 4, а если отличие ионных радиусов не такое резкое, то могут возникнуть группировки с координационным числом 6 и 8.

Так как количество окружающих ионов и размеры внутренней пустоты взаимно связаны, то ясно, что координационное число определяется соотношением ионных радиусов. Если соотношение радиуса катиона к радиусу

аниона близко или несколько превышает 0,4, то координационное число будет равно 4, при величине этого отношения в пределах 0,4-0,7 равно 6, при еще большей величине отношение радиусов равно 8.

Координацию иона с четырьмя другими противоположно заряженными можно представить не только моделью из шаров, но также в виде многогранника, вершины которого являются центрами шаров. Тогда четверная координация будет соответствовать тетраэдру, шестерная - октаэдру, восьмерная - кубу. Поэтому часто вместо четверной координации говорят «тетраэдрическая группировка», вместо шестерной координации - «октаэдрическая группировка».

Особое положение занимает ион водорода. Атом этого химического элемента состоит из одного протона и единственного электрона, вращающегося вокруг него. Следовательно, положительно заряженный ион водорода не имеет собственной электронной оболочки, а представляет собой просто протон. Благодаря своим ничтожным размерам он способен проникать в сферу действия других ионов.

Атомы и ионы, обладающие близкими величинами своих радиусов, могут замещать друг друга. Если вещества имеют однотипный химический состав и близкие размеры составляющих их ионов, то эти вещества могут образовывать смешанные кристаллические структуры. Это явление носит название *и з о м о р ф и з м а*, а такие вещества называются изоморфными по отношению друг к другу. Изоморфизм дословно переводится как «равноформенность» (от греческ. *изос* - равный; *морфе* - форма).

В природе изоморфизм весьма распространен и многие минералы являются изоморфными смесями. Например, распространенный минерал оливин - изоморфная смесь магниального силиката форстерита ($MgSiO_4$) и железистого фаялита (Fe_2SiO_4).

Для формирования структуры исключительно важное значение имеют внешние физико-химические и термодинамические условия. Под влиянием изменения этих условий вещество одного и того же состава может образовывать различные структуры. Это явление получило название *полиморфизма* (от греческ. *полиморфос* - многообразный). Еще в начале прошлого века было замечено, что кристаллы серы, выпадающие из раствора, принадлежат к ромбической сингонии, а кристаллизующиеся из расплава - к моноклинной сингонии.

Полиморфизм широко распространен как среди природных, так и среди искусственных образований. Вещества одного состава, имеющие различную структуру, часто резко отличаются своими свойствами и признаками. Яркий пример этого - полиморфные модификации углерода. Алмаз и графит состоят из чистого углерода, однако имеют различную кристаллохимическую структуру. В результате особенностей расположения атомов алмаз является самым твердым из известных веществ на Земле, кристаллизуется в кубической сингонии, прозрачен, имеет большой удельный вес (3,5). Графит же очень мягок, обладает прекрасной спайностью, кристаллизуется в гексагональной сингонии, имеет в черный цвет, отличается небольшим удельным весом (2,2).

ЗАКОН ПОСТОЯНСТВА УГЛОВ

Как у всякого многогранника, плоскости ограничения кристалла называются гранями. Пересекаясь, грани образуют ребра. Точки пересечения ребер - вершины.

У многих минералов встречаются самые разнообразные кристаллы. Например, у кварца известны крупные кристаллы, величиной более 1 м, и мелкие, измеряемые сотыми долями миллиметра, игольчато-вытянутые и изометричные, призматические и плоские (рис.4). Некоторые грани хорошо

выражены в одних кристаллах, но плохо - в других. Количество и форма граней, их размеры в разных кристаллах кварца могут меняться в зависимости от условий образования. Но характерной особенностью роста кристалла является то, что при этом его грани перемещаются параллельно самим себе. Поэтому углы между соответствующими гранями в кристаллах одного состава остаются неизменными. Это явление, обнаруженное датским ученым Н.Стенсенем (1669) и обобщенное для всех кристаллических веществ французским минералогом Р. де Лиллем (1772), получило название **первого закона кристаллографии**.

Установление этого закона имело исключительно важное значение, так как дало возможность точно характеризовать любые кристаллы посредством измерения.

Для измерения углов между гранями кристалла используют специальные приборы - гониометры. Они могут быть очень простой конструкции, как, например, прикладной гониометр (рис.5). Для точных исследований применяют теодолитный двукружный гониометр (рис.6).

В кристаллографии углы между гранями выражают величиной дополнительно угла, т.е. угла между нормальными к граням.

Если кристалл поместить в центр шара и построить нормали к граням из этого центра, то на шаровой поверхности будут получены точки пересечения нормальными. Эти точки называются полюсами граней, а вся совокупность полюсов граней - сферической проекцией кристалла (рис.7). Используя градусную сеть, можно точно определять место каждой грани посредством сферических координат.

Для изображения результатов измерения служит сетка Г.В.Вульфа. Эта сетка представляет собой стереографическую проекцию (рис.8) системы меридианов и параллельных кругов на плоскость одного из меридианов, подробно тому как это имеет место на одном из географических полушарий.

СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ

Симметрия (в переводе с греческого - гармония, соразмерность) - это определенная закономерность расположения фигур в пространстве. Симметрия очень распространена в природе, но нигде она не проявляется так широко, как в кристаллах. И это понятно, так как симметрия - характерная особенность кристаллов.

Симметричной считается фигура, которая может совмещаться сама с собой в результате одного или нескольких отражений. Эти отражения называются симметрическими преобразованиями, а точки, линии и плоскости, обеспечивающие эти преобразования, - элементами симметрии.


Мы познакомимся со следующими элементами симметрии.

Плоскость симметрии - это плоскость, при отражении в которой фигура совмещается со своим исходным положением (рис.9). Плоскость симметрии - простейшее симметричное преобразование. В природе много фигур, обладающих одной плоскостью симметрии, в том числе среди животных организмов. В стереографической проекции на сетке Вульфа плоскость симметрии изображается дугой большого круга. Условный символ этого элемента симметрии - заглавная буква латинского алфавита *P*. Количество плоскостей симметрии записывается цифрой перед буквой, обозначающей этот элемент симметрии. В разных кристаллах неодинаковое количество плоскостей симметрии. Так, в кубе можно провести девять плоскостей симметрии (рис.10), т.е. $9P$.

Отражение может осуществляться не только в плоскости, но и в точке (рис.11). Отражение точки называют *инверсией*, соответствующий элемент симметрии - *центром инверсии* или *центром симметрии*. Он обозначается буквой *C*. В кристаллах не может быть более одного центра симметрии. Есть кристаллы, лишенные этого элемента симметрии.

Ось симметрии позволяет в результате вращения фигуры вокруг этой оси осуществлять совмещение. Число n , показывающее, сколько раз фигура совмещается с собой при повороте на 360° , называется порядком оси. Всякая фигура обладает бесчисленным количеством осей симметрии первого порядка, так как при повороте фигуры на 360° происходит совмещение. Если фигура не имеет других элементов симметрии, кроме осей первого порядка, то такая фигура называется асимметричной.

Ось второго порядка ($n=2$) обуславливает совмещение при повороте на $360^\circ:2=180^\circ$. Осям третьего, четвертого и шестого порядков соответствуют совмещения при повороте на 120° , 90° , 60° .

Ось симметрии обозначают обычно буквой L , а справа внизу ставят цифру порядка оси. Существуют оси симметрии второго, третьего, четвертого и шестого порядков (рис.11), соответственно их обозначают L_2 , L_3 , L_4 , L_6 . На стереографических проекциях эти оси соответственно обозначают следующими значками: 

В кристалле могут быть оси симметрии различных порядков. Цифра, стоящая перед обозначением оси симметрии, показывает количество этих осей в кристалле. Например, в кубе три оси симметрии четвертого порядка, проходящие через середины противоположных граней, четыре оси третьего порядка, которые проходят через противоположные вершины куба, и шесть осей второго порядка, проходящие через середины противоположных ребер (рис.13). Всего в кубе следующее количество осей симметрии: L_2 , L_3 , L_4 , L_6 .

Помимо рассмотренных выше наиболее простых элементов симметрии, есть более сложные - плоскость скользящего отражения, винтовая ось симметрии и др.

Кристаллы имеют чрезвычайно разнообразные формы. Эти формы можно определенным образом классифицировать по наличию тех или иных

элементов симметрии. Комбинируя различным образом элементы симметрии, можно выделить группы (виды) симметрии.

Каждую группу обозначают особой формулой, составленной из символов симметрии. В первую очередь можно выделить группу асимметричных фигур, совмещающихся с собой лишь в результате поворота на 360° , т.е. имеющих элемент симметрии L_1 . Вторую группу образуют фигуры с более высоким уровнем симметрии, обладающие центром инверсии (С). Самостоятельные группы образуют фигуры, обладающие каждая одной осью симметрии или плоскостью симметрии. Так, выделяется пять групп: L_2 , L_3 , L_4 , L_6 и P . Более сложные группы характеризуются уже несколькими элементами симметрии, например поворотной осью и центром инверсии, поворотной осью и плоскостью симметрии, несколькими перпендикулярными поворотными осями. Все более усложняя эти комбинации, можно получать новые группы симметрии.

Ограниченно ли количество новых групп? На первый взгляд кажется, что количество групп бесконечно. Однако имеются элементы симметрии, которые не могут существовать вместе, например, невозможно существование фигуры, у которой одновременно присутствуют L_4 и L_6 . Комбинации некоторых элементов симметрии обязательно порождают вполне определенные дополнительные элементы. Так, всякая ось симметрии центром инверсии обязательно обуславливает наличие плоскости симметрии, перпендикулярной к этой оси. Поэтому не может быть группы симметрии с формулой L_2C , а обязательно L_2PC .

Изучение этого вопроса позволило математикам и кристаллографам установить, что возможны лишь 32 группы симметрии. Эти 32 группы можно объединить в более крупные классификационные единицы, которые называются *сингониями* (от греч. *син* - вместе; *гония* - угол). Сингония буквально означает «сходноугольность». В каждой сингонии объединяются

группы симметрии с одинаковой главной осью¹ а если ее нет, объединяются группы с одинаковыми неглавными осями. Выделяют следующие сингонии (по возрастанию уровня симметрии): 1) триклинная - нет осей симметрии выше L_1 ; 2) моноклинная - одна ось симметрии второго порядка или плоскость симметрии; 3) ромбическая - несколько (не более трех) осей симметрии второго порядка; 4) тетрагональная - одна главная ось четвертого порядка; 5) тригональная - одна главная ось третьего порядка; 6) гексагональная - одна главная ось шестого порядка; 7) кубическая - несколько главных осей третьего или четвертого порядка.

В свою очередь, сингонии можно объединить в следующие три категории. К категории низших сингоний относятся группы симметрии без главной оси (триклинная, моноклинная и ромбическая сингонии); к категории средних - группы симметрии с одной главной осью (тетрагональная, тригональная и гексагональная сингонии); к категории высших сингоний - группы симметрии с несколькими главными осями (кубическая сингония).

Симметрия неотделима от природы кристаллического вещества. Она проявляется не только во внешней форме, но и во всех свойствах кристалла как физического тела.

Характерная особенность кристаллического вещества - его векторность, т.е. закономерное изменение свойств в разных направлениях. Если взять пластинку стекла, нанести на нее ровным слоем парафин и прикоснуться к стеклу раскаленной иглой, то возле иглы растает круг парафина, так как скорость распространения тепла в стекле во все стороны одинакова. Если такой опыт произвести с пластинкой кристаллического вещества, например пластинчатым кристаллом гипса, то растаявший вокруг иглы парафин будет ограничен не окружностью, а эллипсом. Это происходит в результате того, что теплопроводность в кристалле в разных направлениях меняется в соот-

¹ К главным осям относятся оси симметрии третьего и более высокого порядка.

ветствии с симметрией этого кристалла. Точно так же закономерно меняются в разных направлениях и другие свойства - скорость прохождения света, поглощение световых волн, упругость и т.д.

ЗАКОН РАЦИОНАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФОРМЫ

В 1784 г. Р.Ж.Гаюи опубликовал работу, имевшую важное значение для кристаллографии. Он предположил, что кристаллы состоят из кристаллических молекул, которые, как кубики, слагают здание кристалла. Поэтому положение каждой грани можно выразить числом, а именно отношением количества таких кубиков по трем координатам, за которые принимают три ребра кристалла. Предположим, что изображенная на рис.14 грань отсекает по оси X - p кубиков, по оси Y - q , по оси Z - r . Тогда положение грани можно охарактеризовать отношением $p : q : r$. Отношение этих трех чисел полностью характеризует положение любой грани. Открытие Гаюи получило название закона рациональных отношений. Числа отношения оказываются небольшими, если правильно выбрать единицу измерения. За эту единицу обычно принимаются отрезки, отсеченные от координатных осей особой гранью, которую называют единичной.

Числа p , q , r , отсекаемые гранью, называются ее параметрами. Оказалось, что удобнее пользоваться не параметрами, а обратными величинами: $1/p$, $1/q$, $1/r$. Эти три числа называют индексами грани и обозначают h , k , l . Переход от параметра к индексам несложен. Допустим, что для грани параметры равны $6 : 3 : 2$. Берем обратные величины: $1/6 : 1/3 : 1/2 = 1 : 2 : 3$.

Индексы, заключенные в круглые скобки, представляют собой значение грани, ее символ. В рассматриваемом случае символ грани - (123) . Если грань отсекает отрезок оси X , направленный от центра координат на читателя, то индекс считается положительным; если грань отсекает отрезок за цен-

тром координат, индекс будет отрицательным. Положительные значения оси Y располагаются вправо от центра координат, отрицательные - влево. Положительные значения оси z расположены вверх от центра координат, отрицательные - вниз (рис.15). Положительный знак у индекса не отмечается, отрицательный - ставится над индексом. Так, символ грани (111) указывает, что она отсекает от оси Z отрезок ниже центра координат. Если грань параллельна какой-либо оси, т.е. ее параметр бесконечно велик (∞), то индекс будет равен $1/\infty = 0$. Так, например, символ грани (100) свидетельствует о том, что эта грань параллельна второй и третьей осям координат (рис.16).

Координатные оси обозначают либо через X, Y, Z, либо называют их первой, второй и третьей. Угол ZY обозначают α , угол ZX - β , угол XY - γ . Отрезки, отсекаемые единичной гранью от осей X, Y и Z, соответственно обозначают малыми буквами латинского алфавита a, b, c. Величина углов α , β , γ и осевых единиц a, b, c называется константами кристалла.

Чрезвычайно важным является выбор координатных осей и единичной грани. Это делается с учетом сингонии кристалла (рис.17).

Кубическая сингония	$a = b = c;$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0.$
Тетрагональная сингония	$a = b \neq c;$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$
Ромбическая сингония	$a \neq b \neq c;$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$
Моноклинная сингония	$a \neq b \neq c;$	$\alpha = \gamma = 90^0; \beta \neq 90^0.$
Триклинная сингония	$a \neq b \neq c;$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^0.$

В гексагональной и тригональной сингониях четыре оси; за ось Z принимается главная (рис.18): $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^0, \gamma = 120^0/$

При наличии определенных элементов симметрии из одной плоскости образуются закономерные фигуры.

Предположим, имеется плоскость, параллельная оси симметрии четвертого порядка. В результате симметрических преобразований возникает фигура, которая называется тетрагональной призмой. Если имеется плоскость, наклонная к оси L_4 , то будет образована другая фигура - тетрагональ-

ная пирамида. Такие фигуры, которые образуются из одной плоскости при помощи элементов симметрии той или иной группы, называются простыми формами.

Каждая грань простой формы имеет свой символ. Например, символ грани куба $ABCD$ - (100) , грани $BCEF$ — (010) , $ABFP$ - (001) и т.д. Для обозначения всей формы используют символ одной грани, но в фигурных скобках - $\{100\}$.

Таким образом, символ простой формы, которую мы называем кубом, - $\{100\}$, символ октаэдра - $\{111\}$, ромбододекаэдра - $\{110\}$. Простые формы, характерные для разных сингоний, показаны на рис.19, 20, 21.

Природные кристаллы часто образованы гранями не одной, а нескольких простых форм. Сочетание нескольких простых форм общей сингонии, называется комбинацией. Известно 47 простых форм природных кристаллов. Их различные сочетания создают чрезвычайно большое количество комбинаций.

Контрольные вопросы к самостоятельной работе студентов

1. Что такое симметрия и как она проявляется природе?
2. Сформулируйте первый закон кристаллографии и объясните как он связан со строением кристаллического вещества.
3. Назовите элементы симметрии и рассмотрите возможности их комбинирования.
4. Что такое сингонии? Какие существуют сингонии, их характеристика и группировка.
5. В чем заключается второй закон кристаллографии? Раскройте понятие о единичной грани.

6. Каковы особенности расположения и соотношения координатных осей в разных сингониях?
7. Что такое простая форма, открытая и закрытая? Назовите простые формы низших сингоний.
8. Как определяются индексы граней? Назовите распространенные формы средних сингоний. Приведите примеры индексов их граней.
9. Как обозначается символ простой формы? Назовите распространенные простые формы кубической сингонии и укажите их символы.
10. Что собой представляют комбинации простых форм? Приведите простейшие примеры комбинаций простых форм кубической сингонии.
11. Дайте определение явлениям полиморфизма и изоморфизма.

Рекомендуемая графическая работа

Начертите тетрагональную бипирамиду и координатные оси. Надпишите на всех гранях их индексы.

Глава II. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ МИНЕРАЛОВ

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Как любое физическое тело, каждый минерал обладает определенными свойствами: весом, цветом, твердостью и пр. Сравнительное изучение этих свойств позволяет различать и диагностировать минералы. Физические свойства минералов, используемые для их определения, называются **д и а г н о - с т и ч е с к и м и**.

Удельный вес минералов колеблется в широких пределах - от 19-21 (минералы группы самородной платины) до 1 и даже меньше (минералы группы озокерита). Обычно соединения тяжелых металлов обладают большим удельным весом, чем соединения легких элементов. Наряду с этим

удельный вес минералов зависит от их кристаллохимической структуры. Например, алмаз благодаря более плотной упаковке атомов почти в два раза тяжелее графита, хотя оба эти минерала состоят из одного и того же химического элемента - углерода.

Основная масса минералов имеет удельный вес 2,5-3,5; непрозрачные минералы обычно тяжелее прозрачных (рис.22).

Удельный вес минерала в крупных штуфах в поле можно определить ориентировочно (легкий, тяжелый), а в лаборатории - точными методами, например пикнометрическим. В мелких обломках удобно разделение минералов в бромформе (жидкости с удельным весом 2,9) на две группы: легкие, которые плавают в бромформе, и тяжелые, которые в нем тонут.

Плотность кристаллохимической структуры минералов отражается также на их **твердости**. Твердость оценивают устойчивостью минералов к царапающему действию острого предмета. Точно твердость определяют глубиной черты, которую оставляет алмазная игла на поверхности минералов под определенной нагрузкой. Для определения твердости удобно пользоваться шкалой Мооса - набором из 10 минералов, расположенных по возрастанию твердости:

Тальк	- 1	Полевой шпат	- 6
Гипс	- 2	Кварц	- 7
Кальцит	- 3	Топаз	- 8
Флюорит	- 4	Корунд	- 9
Апатит	- 5	Алмаз	- 10

Для примерного определения твердости можно пользоваться следующими ориентирами. Твердость ногтя - около 2,5, оконного стекла - 5,5-6, напильника - около 7. Если минерал пишет на бумаге, то его твердость - 1.

Преобладают минералы с твердостью 3-7. Прозрачные минералы с высоким светопреломлением обладают высокой твердостью. Таковы гранаты, твердость их 7,5-8, топаз, турмалин и берилл - 8, корунд - 9, алмаз - 10.

Высокая твердость минерала не означает его устойчивости к раздавливанию. Некоторые минералы с высокой твердостью довольно хрупкие, например, гранаты. При характеристике механических свойств минералов отмечаются не только твердость и хрупкость, но и другие особенности, свойственные некоторым из них, - упругость, ковкость.

Другим важным свойством минералов, обусловленным их строением, является **спайность** - способность раскалываться по определенным плоскостям, обычно вдоль одной из главных плоскостей кристаллохимической структуры. Поэтому плоскости спайности имеют гладкую блестящую поверхность и характеризуются простым кристаллографическим индексом. Так, кальцит обладает спайностью по ромбоэдру $\{1011\}$, галенит - по кубу $\{100\}$, гипс - по пинакоиду $\{010\}$.

По легкости образования плоскостей спайности при раскалывании минералов выделяют следующие категории спайности.

В е с ь м а с о в е р ш е н н а я - минерал трудно расколоть по другим плоскостям, кроме спайных, а плоскости спайности имеют идеально гладкую поверхность (например, слюды).

С о в е р ш е н н а я - минерал легко раскалывается, преимущественно по спайным плоскостям (кальцит, галенит).

Я с н а я - среди разных плоскостей излома можно заметить блестящие спайные плоскости (полевые шпаты, амфиболы).

Н е с о в е р ш е н н а я спайность практически не обнаруживается при раскалывании минерала.

Для некоторых минералов характерна не спайность, а **излом**, т.е. неровная поверхность, образующаяся при разламывании. Среди видов излома

различают **раковистый** (кремень), **занозистый** (асбест), **крючковатый** (самородное серебро), **землистый** (каолинит).

Излом, так же как и спайность, обусловлен особенностями строения минерала. Для минералов с совершенной спайностью в нескольких направлениях характерен ступенчатый излом, для минералов волокнистого строения типичен занозистый, а для аморфных минералов - раковистый излом.

Кристаллохимическая структура обуславливает **оптические свойства** минералов. Скорость распространения световых колебаний в кристалле зависит от плотности его структуры. Чем плотнее кристаллохимическая структура, тем медленнее распространяются световые лучи. Так как плотность структуры в разных направлениях в кристалле обычно неодинакова (за исключением кристаллов кубической сингонии), то и скорость света в кристалле будет меняться в разных направлениях.

Отношение между скоростью света в воздухе и в кристалле называется показателем светопреломления. Переход луча света из одной среды в другую, с иной плотностью сопровождается отклонением этого луча. Поэтому прозрачные минералы с высокой плотностью структуры характеризуются значительным отклонением световых лучей. Это воспринимается глазом в виде красивой «игры света», характерной для драгоценных камней (топаза, алмаза, сапфира и др.). Преобладают минералы с показателем светопреломления от 1,500 до 1,700 (рис.23).

Прозрачность. Минералы могут полностью поглощать или отражать световые лучи, а могут их пропускать. Многие минералы сильно поглощают свет, но в тонких пластинках все-таки слабо просвечивают. Выделяют непрозрачные, прозрачные и слабо прозрачные минералы. Примером непрозрачных минералов может служить большая часть сульфидов, самородные металлы. Прозрачными являются горный хрусталь, исландский шпат. Прозрачны в тонких осколках полевые шпаты, пироксены, амфиболы и многие дру-

гие минералы.

Блеск - это характеристика отражения световых лучей от поверхности минерала. Если поверхность гладкая, ровная, то происходит отражение параллельных лучей, воспринимаемое глазом в виде блеска. Если поверхность неровная, то световые лучи рассеиваются, выделяя при этом жирный, восковой и матовый блеск.

В случае гладкой поверхности блеск определяется интенсивностью поглощения и преломления света. При этом важное значение имеет кристаллохимическая структура минерала. Непрозрачные минералы, обладающие гомополярным типом связи, имеют **металлический блеск**. В той или иной степени блеск прозрачных минералов зависит от их светопреломления, т.е. от плотности кристаллохимической структуры. Прозрачным минералам с величиной светопреломления в пределах 1,3-1,8 обычно свойствен **стеклянный блеск** (полевые шпаты, амфиболы, слюды). Для высокопреломляющих минералов с показателем светопреломления от 1,9 до 2,6 типичен **алмазный блеск** (касситерит, сфалерит, алмаз). У плохо прозрачных минералов с высоким светопреломлением (более 2,6) обычно **полуметаллический блеск** (гематит, киноварь).

Цвет минералов обусловлен избирательным поглощением отдельных интервалов волн видимой части спектра при отражении или пропускании света. В ряде случаев это связано с вхождением в кристаллохимическую структуру минерала определенных ионов.

Например, если в структуру глиноземистых гранатов входит магний, то минерал имеет кроваво-красный цвет (пироп), а если позиции этого химического элемента заняты ионами кальция, то минерал имеет желтоватый или зеленоватый цвет (гроссуляр). В других случаях цвет минерала обусловлен механической примесью. Так, бесцветные кристаллы кварца благодаря примеси мельчайших кристалликов синего турмалина приобретает голубую ок-

раску. Цвет некоторых минералов меняется под действием радиоактивного излучения. Например, бесцветный флюорит при этом приобретает фиолетовую окраску.

Для диагностики минералов особенно интересен цвет порошка минерала - **цвет черты** на матовой фарфоровой пластинке. При этом цвет черты не обязательно совпадает с цветом крупного образца. Например, цвет пирита в обломке или в кристалле латунно-желтый, а цвет черты этого минерала черный, с зеленоватым оттенком.

У некоторых минералов наблюдается ложная окраска. Она связана не с цветом самого минерала, а с наличием мелких включений или системы трещин. При этом происходит интерференция лучей света, которые отражаются как от поверхности минерала, так и от поверхности включений и трещин, что воспринимается глазом в виде радужной игры цветов. Это явление получило название *и р и з а ц и и*. Иризация весьма характерна для минерала лабрадора, содержащего тончайшие включения пластинчатых кристаллов гематита по плоскостям спайности.

На поверхности воды иризирующие пленки образуют маслянистые жидкости (нефть, керосин). Такие же радужные пленки на поверхности минералов называются *п о б е ж а л о с т ь ю*. Побежалость типична для ковеллина, натечных форм гидрогематита и гидрогётита.

Существуют другие свойства и признаки, имеющие важное диагностическое значение. Одни минералы обладают **магнитностью** (магнетит, пирротин), другие - **радиоактивностью** (уранинит), третьи способны к **люминесценции** (светятся под действием катодных и ультрафиолетовых лучей), как, например, кальцит и алмаз.

МОРФОЛОГИЯ МИНЕРАЛОВ

Особенности кристаллохимической структуры минералов отражаются

на их кристаллических формах. Однако далеко не все минералы, имеющие кристаллическое строение, встречаются в виде хороших кристаллов. Одни минералы обычно образуют зернистые массы, часто очень мелкокристаллические. Другие наблюдаются в виде довольно крупных кристаллов, но эти реальные кристаллы обычно имеют большие или меньшие отклонения от идеальных форм. Кристалл может казаться совершенно иной сингонии благодаря развитию одной-двух граней за счет других или иметь изометрические очертания, равномерные по всем осям. Кристалл может быть вытянут по оси Z так, что будет напоминать иглу или волосок или сплюснен в пластинку, которая может быть толстой или тонкой. Некоторые кристаллы бывают деформированы, изогнуты (рис.24).

Грани кристаллов неодинаковы. Некоторые блестящие, другие матовые, на третьих наблюдаются особые образования (штриховка, закономерные наросты или углубления), так называемые *в и ц и н а л и* (от лат. *вицинус* - сосед). Вицинали обычно являются плохо образованными, только намечающимися гранями.

При изучении реальных кристаллов важно описать их **облик (габитус)**. При характеристике облика стараются дать какое-нибудь простое определение, сравнивая изучаемый кристалл с простой распространенной кристаллографической фигурой. Так, выделяют бипирамидальный, призматический габитус. Сравнение производят также по внешнему виду - чешуйчатый, листоватый, пластинчатый, столбчатый габитус и т.д.

Изолированные кристаллы встречаются в природе довольно редко. Значительно чаще они образуют разного рода срастания. Известны закономерные срастания. Сросшиеся кристаллы, соответствующие грани которых расположены параллельно, называются *п а р а л л е л ь н ы м и с р о с т к а м и*. Но бывают такие закономерные срастания кристаллов, в которых один индивид может быть выведен из другого посредством поворота вокруг двой-

никовой оси на 180° или отражением в двойниковой плоскости. Такие срастания называют двойниками. Различают **двойники срастания** и **прорастания** (рис.25). В зависимости от числа сросшихся индивидов выделяют простые и полисинтетические двойники. Некоторые минералы образуют двойниковые срастания наподобие ветвей дерева, так называемые **дендритовые формы**, характерные для самородных меди и золота, а также минералов группы гидроокислов марганца (рис.26).

Незакономерные срастания (агрегаты) минералов весьма многообразны. Среди них наиболее распространены следующие.

Друза - группа сросшихся кристаллов, имеющих общее основание (рис.27). Друзы характерны для многих минералов, встречающихся в виде хороших кристаллов. **Конкреции** - округлые образования, возникающие в результате постепенного нарастания минералов от центра к периферии (рис.28а). Конкреции типичны для мелкокристаллических и аморфных минералов (например, гидрогетита), хотя встречаются конкреции и хорошо окристаллизованных минералов (например, гипса). Одной из разновидностей конкреции являются **олиты** - мелкие конкреции с ясно выраженным концентрическим строением. Секреции образуются в результате заполнения минералом пустот от стенок к центру (рис.28,б). Крупные секреции называют **жеодами**. Выпадающие из растворов минералы образуют натечные формы, корки, налеты.

Контрольные вопросы к самостоятельной работе студентов

Перечислите важнейшие физические свойства минералов.

В каких пределах меняется удельный вес минералов?

Как оценивается твердость минералов?

Что такое спайность минералов, её причины и категории спайности.

Что такое светопреломление минералов и его причины.

Какими показателями характеризуется цвет минералов?

Каковы причины окраски прозрачных минералов?

Что такое ирризация и побежалость?

Как характеризуется облик (габитус) реальных кристаллов?

Что такое вицинали?

Какие существуют виды сростаний реальных кристаллов? Что такое двойники и их виды.

Какие существуют виды минеральных стяжений? В чем различие конкреций и секреций?

Глава III. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ (за исключением силикатов)

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ЗЕМНОЙ КОРЫ

Общее число минералов не так уж велико - порядка 2000, из них широко распространены 400-500 видов. Уже теперь человек может искусственно синтезировать значительно большее количество соединений. По-видимому, ограниченное число минералов находится в связи, во-первых, с особенностями состава земной коры, а во-вторых, с определенными процессами, в результате которых возникают эти природные образования.

Рассматривая состав земной коры, видим, что восемь химических элементов практически слагают основную ее массу. Кислород, кремний, алюминий, железо, кальций, калий, натрий и магний образуют более 99% массы земной коры. Но самое замечательное заключается в том, что наибольшим распространением пользуется кислород, который составляет почти половину массы коры. Если учесть объем, который занимают различные химические элементы благодаря своим ионным радиусам, земная кора предстанет перед нами как своеобразная твердая кислородная оболочка, состоящая в основном

из кислородных ионов, занимающих более 90% всего объема, между которыми находятся остальные химические элементы. Итак, чем больше содержится химического элемента в земной коре, тем, как правило, больше встречается минералов, в состав которых он входит. Например, известно более 1000 минералов, в состав которых входит кислород, несколько сотен минералов кремния, более 200 минералов железа и всего несколько минералов кадмия.

Разную способность химических элементов к образованию минералов в условиях земной коры иллюстрирует рис.29. На этом графике по вертикальной оси в логарифмическом масштабе отложено число минералов, в состав которых входит данный элемент, а по горизонтальной оси нанесены химические элементы в порядке возрастания их атомного веса.

Верхняя горизонтальная пунктирная линия позволяет выделить группу химических элементов, образующих большое количество минералов - от 100 и более. Сюда относятся O, H, Si, S, Ca, Fe, Al, C, P, Na, Mg, Mn, Pb и As.

Нижняя пунктирная линия отделяет химические элементы, минералы которых отсутствуют или настолько редки, что до сих пор не обнаружены. Таковы Ga, Rb, In, Hf, Re, Ra некоторые элементы группы редких земель и платины. Элементы группы инертных газов также не образуют природных соединений с другими элементами.

Большая часть химических элементов образует от нескольких до десятков минералов.

Следует отметить, что наряду с образованием самостоятельных минералов, в состав которых данный химический элемент входит в значительном количестве и может быть отражен в их формулах, этот же элемент может присутствовать в других минералах, изоморфно входя в их кристаллохимическую структуру или находясь в состоянии рассеяния. Это состояние, которое еще пока недостаточно хорошо изучено, особенно характерно для хими-

ческих элементов, редко встречающихся в виде самостоятельных минералов или совсем их не образующих. Химические элементы, присутствующие в рассеянном состоянии, в формуле минерала не показывают.

Так как минералы - это химические соединения, то в основу их классификации положен химический состав. Выделяют следующие крупные группы (типы) минералов:

- 1) самородные элементы;
- 2) сернистые и близкие им соединения (сульфиды, арсениды, антимониды и др.);
- 3) галоидные соединения;
- 4) окислы и гидроксиды;
- 5) кислородные соли, в том числе:
 - а) карбонаты;
 - б) сульфаты, хроматы, вольфраматы, молибдаты;
 - в) фосфаты, арсенаты, ванадаты;
 - г) силикаты и некоторые другие.

Среди всего многообразия минералов обратим внимание на следующие две категории: - породообразующие минералы, составляющие основную массу горных пород, и минералы, имеющие промышленное значение, главным образом рудные. Они менее распространены по сравнению с породообразующими, хотя в отдельных местах встречаются в виде крупных скоплений (рудных залежей). Обзор минералов проводится в последовательности приведенной выше классификации.

САМОРОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В самородном состоянии (в химически свободном, а не в виде соединений с другими химическими элементами) на Земле обнаружено несколько десятков элементов. Их содержание невелико - примерно 0,1% от массы ве-

щества литосферы, гидросферы и атмосферы, вместе взятых. Среди них около половины составляют азот и кислород, образующие газовую оболочку нашей планеты. Среди других самородных газов отметим водород и инертные газы, а среди твердых веществ - углерод, серу, золото, элементы платиновой группы и медь. Значительно менее распространены в самородном виде железо, ртуть, мышьяк, сурьма.

Некоторые химические элементы встречаются на нашей планете преимущественно в самородном состоянии. Их называют благородными элементами. Характерная особенность минералов этого типа - распространенные явления полиморфизма.

Остановимся на краткой характеристике самородных металлов. Для них характерен тип металлической связи в кристаллических структурах, поэтому они обладают соответствующими свойствами - электропроводностью, металлическим блеском, ковкостью. Среди самородных металлов часто встречаются твердые растворы (например, серебра в золоте, железо в платине и др.).

Золото. Этот химический элемент на Земле встречается главным образом в самородном состоянии. Известны лишь очень редкие соединения его с теллуrom. Золото кристаллизуется в кубической сингонии, часто образуя хорошие кристаллы, обычно с преобладанием форм октаэдра, реже ромбододекаэдра и куба. Плоскости октаэдра часто несут разнообразные вицинали. Кристаллы образуют двойники и характерные дендритоподобные сростки (рис.30). Для химического состава минерала типична постоянная примесь в виде твердого раствора серебра, реже меди. При содержании серебра более 15% минерал называют электрумом. С увеличением примеси серебра уменьшается интенсивность желтого цвета и появляется белый оттенок.

Характерными признаками являются высокий удельный вес (тонет в ртути) и высокая устойчивость к кислотам. Растворяется (и то с трудом)

только в царской водке и цианистых соединениях.

Медь и серебро в самородном состоянии встречаются значительно реже. Они кристаллизуются также в кубической сингонии, образуют дендритовые формы, особенно типичные для меди.

Самородная платина в совершенно чистом виде встречается очень редко. Значительно большее распространение имеет минерал поликсен (от греч. *поли* - много; *ксенос* - чужой) - твердый раствор железа в платине, содержащий около 10% железа. Известны твердые растворы в платине палладия (до 40%), а также меди, никеля, иридия. Кристаллизуется в кубической сингонии, но кристаллы редки, обычны сплошные массы, иногда образующие самородки в несколько граммов. Цвет минерала стально-серый, в кислотах (кроме царской водки) не растворяется.

Самородное железо содержит примеси никеля (до 25% в железе из метеоритов), кобальта, меди и платины. Этот минерал в литосфере встречается очень редко, но представляет большой интерес, так как слагает основную массу металлических метеоритов. В метеоритном железе содержание никеля значительно выше - до нескольких десятков процентов. Самородное железо кристаллизуется в кубической сингонии, но для его высокотемпературной модификации, характерной для метеоритов, типичны вытянутые игольчатые образования, пересекающиеся под углом 60° и образующие своеобразную сетку так называемых видманштеттовых фигур.

Из самородных неметаллов в первую очередь следует назвать минералы углерода - алмаз и графит.

В кристаллохимической структуре **алмаза**, основанной на атомной связи, каждый атом углерода прочно связан с четырьмя другими атомами, тетраэдрически расположенными вокруг него (рис.31а). Подобная структура обуславливает чрезвычайно высокую твердость и устойчивость по отношению к колебаниям температуры и давления, а также к воздействию кислот и

щелочей. Название «алмаз» происходит от греческого слова «адамас» - неодолимый.

Алмаз кристаллизуется в кубической сингонии. Кристаллы обычно имеют октаэдрический габитус. Грани часто округлые (рис.32). Минерал бесцветен, но под влиянием примесей может быть окрашен (например, черный алмаз - карбонадо). Характерные диагностические признаки - высокая твердость, большой удельный вес и голубовато-зеленые цвета люминесценции под действием ультрафиолетовых лучей. Единица массы алмазов - карат (0,2 г).

Алмаз не только дорогой драгоценный камень. Как самый твердый минерал на Земле, он имеет огромное значение в технике. Крупным успехом геологов явилось открытие месторождений отечественных алмазов. Достаточно сказать, что еще в 50-х годах наша страна покупала технические алмазы, а теперь имеет необходимое количество своих самородных алмазов и изготавливаемых путем синтеза.

Графит - вторая разновидность самородного углерода. Каждый атом в структуре графита окружен тремя другими, лежащими в одной плоскости. В результате образуется серия гексагональных сеток, расстояние между которыми почти в три раза больше, чем расстояния между атомами в плоскости сеток (рис.33). Это определяет основные свойства графита - его кристаллизацию в гексагональной сингонии, черный цвет (часто со стальным оттенком), низкую твердость и совершенную спайность по базопинакоиду (0001). Связь в кристаллохимической структуре графита близка к атомной, но в то же время имеет некоторые особенности, сближающие ее с металлической. Этим объясняется металлический оттенок в цвете графита, а также его высокая электропроводность. Для химического состава минерала типично значительное количество примесей (10—20% и более), которые после сгорания остаются в виде золы.

Графит имеет широкое и разнообразное применение в производстве - от металлургии (плавильные тигли) и атомной промышленности (графитовые замедлители) до изготовления карандашей.

Самородная сера представлена ромбической модификацией этого элемента. Ее кристаллохимическая структура очень сложна и основана на молекулярном типе связи. Так как молекулы электрически нейтральны, то сера является хорошим электроизолятором. В силу сравнительно непрочной молекулярной связи этот минерал обладает хрупкостью, низкой твердостью (1—2) и невысокой температурой плавления (+112,8 °С). Цвет желтый с различными оттенками в зависимости от наличия примесей. Кристаллы имеют бипирамидальный и столбчатый облик и в отдельных случаях достигают крупных размеров (в несколько дециметров).

Сера находит применение в химической промышленности - в производстве серной кислоты и других химикатов; для вулканизации резины с целью изготовления изделий различной степени эластичности; для производства взрывчатых веществ; в сельском хозяйстве как средство борьбы с вредными насекомыми.

СЕРНИСТЫЕ И БЛИЗКИЕ ИМ СОЕДИНЕНИЯ

К минералам этой группы относятся природные сернистые, а также мышьяковистые, сурьмянистые, селенистые и теллуристые соединения металлов. Сернистые соединения (сульфиды) резко преобладают. По подсчетам В.И.Вернадского, эти минералы составляют около 0,15% массы земной коры. Другие соединения содержатся в подчиненном количестве.

Для рассматриваемых минералов особенно типичны сульфиды тяжелых металлов. С этими элементами сера образует устойчивые соединения, почти нерастворимые в воде, в то время как сернистые соединения легких металлов I и II групп таблицы Д.И.Менделеева легко растворимы и в природе

известны лишь в растворенном состоянии.

Особое положение занимает сероводород; большая часть сернистых соединений является его производным.

Кристаллохимическая структура сернистых и им подобных соединений относится к типу ионной связи, хотя имеет много общих черт с типом атомной связи. Это обусловлено тем, что анионы серы, мышьяка, сурьмы, селена и теллура имеют большие радиусы и склонны к поляризации, а катионы металлов обладают способностью поляризовать противоположно заряженные ионы. В результате в кристаллохимической структуре происходит частичное объединение электронов соседних разноименных ионов. Поэтому сульфиды и им подобные минералы приобретают свойства, которые характерны для металлов, - металлический блеск, электропроводность и др.

Многочисленные сернистые минералы подразделяют на два класса:

1-й класс - простые сернистые и им подобные соединения;

2-й класс - сульфосоли, имеющие сложный состав. Мы рассмотрим наиболее распространенные минералы, преимущественно из 1-го класса. Почти все эти минералы имеют важное народнохозяйственное значение, образуя руды цветных и редких металлов.

Галенит (свинцовый блеск) - PbS . Сингония кубическая. В кристаллохимической структуре каждый анион серы окружен шестью катионами свинца. Облик кристаллов кубический, реже октаэдрический (рис.34). Обычно минерал встречается в виде вкраплений и сплошных масс, очень часто вместе со сфалеритом и другими сульфидами.

Цвет галенита свинцово-серый, черта серовато-черная, блеск металлический. Минерал обладает низкой твердостью (2-3) и хрупкостью. Характерные его признаки - прекрасная спайность по кубу и большой удельный вес. Растворяется в азотной кислоте.

Галенит образует основную часть свинцовых руд. Металлический свинец имеет разнообразное применение. Он идет на изготовление кислотоупорных изделий, применяется в электротехнике (аккумуляторы, покрытие электрокабелей), в строительной, химической, медицинской и оборонной промышленности. Свойство свинца задерживать радиоактивные излучения широко используется в атомной промышленности, а также при изготовлении оборудования для космических исследований.

Галенит состоит в основном из свинца и серы, но в нем всегда содержится некоторое количество примесей других химических элементов - селена, висмута, мышьяка, сурьмы, цинка, меди, железа. Особенно типично постоянное присутствие серебра, которое часто извлекают из галенитовых руд.

Сфалерит (цинковая обманка) - ZnS . Сингония кубическая. Для кристаллохимической структуры характерна тетраэдрическая координация. Облик кристаллов тетраэдрический. На гранях часто имеется вицинальная штриховка (рис.35). Под микроскопом обнаруживаются полисинтетические двойники. Сфалерит образует выделения неправильных очертаний и крупные скопления.

Характерные диагностические признаки минерала - весьма совершенная спайность по ромбододекаэдру $\{110\}$ и интенсивный алмазный блеск по плоскости спайности. Твердость минерала - 3-4. Он хрупок. Растворяется в концентрированной азотной кислоте. Цвет меняется в зависимости от количества примеси мелких выделений сульфида железа (пирротина) и некоторых других сульфидов. Разности, лишенные таких включений (кле й о ф а н ы), имеют желтоватый цвет и белую черту. В случае большого количества включений пирротина минерал приобретает черный цвет и коричневую черту. Такие разности называются марматитами. Обычно сфалерит имеет коричневый цвет.

Сфалерит - важнейший минерал цинковых руд. Значение цинка в со-

временной жизни очень велико. Этот металл используется для предохранения железа от коррозии, употребляется в электротехнике. В виде сплава с медью (латунь) имеет широкое применение в машиностроении и приборостроении, в виде различных соединений используется в химической, строительной и медицинской промышленности.

Сфалерит богат примесями различных элементов. Часть их образует мелкие выделения самостоятельных минералов (сульфидов железа, меди, иногда олова). Другие входят в кристаллохимическую структуру сфалерита в результате явлений изоморфизма. Некоторые из ценных редких металлов (кадмий, индий, галлий) извлекают из сфалеритовых руд попутно с получением цинка.

Сульфиды меди. Халькозин (от греческ. *халкос* - медь) - Cu_2S . Сингония ромбическая. Кристаллохимическая структура, несмотря на простой химический состав минерала, очень сложная. Обычно этот минерал образует не кристаллы, а вкрапления и сплошные тонкозернистые массы. Иногда встречается в виде псевдоморфоз по другим сульфидам (халькопириту, сфалериту и др.).

Цвет минерала серый, блеск металлический, черта темно-серая, твердость низкая (2-3). В кислотах хорошо растворим; растворяясь в азотной кислоте, окрашивает раствор в зеленый цвет, при этом на поверхность всплывает сера.

Ковеллин - CuS . Сингония гексагональная. Кристаллохимическая структура сложная. Кристаллы очень редки. Минерал встречается в виде порошковатых сажистых масс или тонких примазок. Характерным признаком ковеллина является темно-синий цвет, часто с побежалостью. Черта черная, блеск слабый, в порошковатых разностях отсутствует. Твердость очень низкая (1-2). Растворяется в горячей азотной кислоте.

Халькопирит (медный колчедан) - CuFeS_2 . Сингония тетрагональная. Кристаллохимическая структура напоминает структуру сфалерита: каждый ион серы окружают два иона меди и два - железа. Кристаллы встречаются довольно редко, они имеют октаэдрический или тетраэдрический облик. Обычно минерал выделения неправильной формы или массивные скопления. Под микроскопом в полированных шлифах часто обнаруживаются полисинтетические двойники.

Цвет халькопирита латунно-желтый, иногда с побежалостью, блеск металлический. Черта зеленовато-черная. Твердость - 3-4. Медленно растворяется в азотной кислоте.

Перечисленные выше сульфиды являются основным сырьем, из которого извлекают медь. При этом халькопирит слагает первичные руды, которые в результате последующих процессов могут перейти в более богатые медью руды, состоящие из халькозина и ковеллина. Подробнее этот процесс описан при характеристике выветривания сульфидных руд.

В развитии человеческого общества медь играла важную роль, и в настоящее время значение этого металла трудно переоценить. Вряд ли можно найти такую отрасль народного хозяйства, где бы она ни использовалась. В связи с широким спросом на медь и ограниченностью ее ресурсов остро стоит проблема заменителей этого металла.

Киноварь - HgS . Сингония тригональная. Кристаллохимическая структура сложная. Кристаллы имеют ромбоэдрический облик, а когда развиты грани формы $\{0001\}$ - таблитчатый. Типичны двойники прорастания. Образует мелкие вкрапления, примазки по трещинам, землистые скопления.

Признаки минерала не позволяют спутать его с другими. Киноварь имеет карминно-красный цвет и красную черту, алмазный блеск на гранях, низкую твердость (2), ясную спайность по призме $\{1010\}$ и высокий удельный вес (8,09-8,20). При нагревании в открытой стеклянной трубке возгоня-

ется с осаждением металлической ртути. Растворяется с трудом в царской водке.

Киноварь - основной источник получения ртути. Этот металл длительное время используется в химической и электротехнической промышленности, необходим для многих медицинских препаратов и применяется в военной промышленности.

Молибденит - MoS_2 . Любопытно, что название происходит от греческого слова *молибдос* - свинец. Сингония гексагональная. В кристаллохимической структуре слои ионов молибдена располагаются между двумя слоями анионов серы, параллельно базопинакоиду. Это отражается на весьма совершенной спайности по $\{0001\}$. Кристаллы молибдена редки, они имеют таблитчатый облик благодаря сильно развитым граням базопинакоида (рис.36). Обычно минерал образует листоватые, веероподобные и сферолитовые агрегаты.

Цвет минерала свинцово-серый, с металлическим блеском, с чем, по видимому, и связано его название. Черта серая. Твердость очень низкая (1), пишет на бумаге, как графит. В кислотах растворяется с очень большим трудом при кипячении.

Молибденит - единственный промышленный минерал молибдена, чем объясняется его исключительное значение. Молибден - важнейший элемент для современной сталелитейной промышленности. Применяется для изготовления танковой и корабельной брони, артиллерийских орудий и снарядов, высокоточных металлообрабатывающих станков.

Антимонит (от лат. *антимониум* - сурьма) - Sb_2S_3 . Сингония ромбическая. В кристаллохимической структуре минерала выделяются вытянутые ленты соединений атомов сурьмы и серы. Эти особенности структуры отражаются на внешнем облике кристаллов - они призматически вытянуты вдоль третьей кристаллографической оси, часто игольчатые (рис.37), с вертикаль-

ной вицинальной штриховкой. В отдельных случаях кристаллы столь тонкие, что образуют спутанно-волокнистые агрегаты. Цвет и черта свинцово-серые, блеск металлический. Твердость низкая (2-2,5), минерал хрупок, спайность совершенная по второму пинакоиду {010}. Легко плавится (в пламени свечи), растворяется в кислотах и КОН. Капля раствора КОН оставляет на минерале красное пятно. В антимоните присутствуют разнообразные элементы-примеси, среди которых типичны золото и серебро.

Сурьма широко используется для антифрикционных сплавов, необходима для изготовления типографического и электротехнического оборудования, применяется в химической и военной промышленности. Антимонит - основной источник сурьмы.

Висмутин - Bi_2S_3 . Минерал весьма напоминает антимонит. Он обладает аналогичной кристаллохимической структурой и ромбической сингонией, кристаллы также имеют удлиненно-призматический облик и совершенную спайность по {010}. Растворяется в азотной кислоте. От антимонита отличается отрицательной реакцией на КОН и более белым цветом с металлическим, свинцовым оттенком. Как и антимонит, висмутин содержит разнообразные элементы-примеси (Pb, Cu, Fe, As, Sb, Te и др.).

Извлечение висмута производится главным образом из висмутина. Висмут широко используется для изготовления легкоплавких сплавов, для производства стекол специального назначения, разнообразных химических и медицинских препаратов. Сплавы висмута находят широкое применение в электронной технике.

Сульфиды железа. Пирротин (от греческ. *пир* - огонь; *пиррос* - огнецветный) - FeS . Содержание серы всегда несколько повышенное по сравнению с формулой. Сингония гексагональная. В кристаллохимической структуре каждый атом серы окружен шестью атомами железа. Кристаллы имеют таблитчатый по базопинакоиду облик, но они редки. Как правило,

этот минерал образует выделения неправильной формы или сплошные массы.

Цвет пирротина темно-бронзовый, часто с побежалостью. Черта темно-серая, блеск металлический. Твердость - 4. Характерной особенностью является магнитность, благодаря чему у минерала есть второе название - магнитный колчедан. В кислотах растворяется с трудом.

Пирит (железный, или серный колчедан) - FeS_2 . Сингония кубическая. Кристаллохимическая структура характеризуется наличием сильно поляризованных пар двухвалентных ионов серы. Каждый ион железа окружен шестью такими парами (рис.38). Для пирита характерны хорошо образованные кристаллы, обычно сформированные гранями куба {100} и пентагондодекаэдра {210}. Грани куба обычно несут вицинальную штриховку (рис.39). Встречается также в виде зернистых агрегатов и сплошных масс.

Твердость минерала довольно высокая (6-6,5); пирит единственный из сульфидов, чертящий стекло. Цвет латунно-желтый, но черта зеленовато-черная. Блеск металлический. В кислотах растворяется с трудом.

Пирит - самый распространенный сульфид. Часто он образует крупные скопления и поэтому используется для получения серной кислоты. Пирит содержит примеси меди, цинка, селена, золота, кобальта. Иногда эти элементы попутно извлекаются из пиритных руд.

Марказит имеет тот же состав, что и пирит, однако иное кристаллохимическое строение. Сингония ромбическая. Иногда образует таблитчатые и копьевидные кристаллы. Весьма характерны конкреции, часто сферической формы, и псевдоморфозы по остаткам растительных и животных организмов.

По свойствам марказит очень близок к пириту, от которого отличается с трудом лишь несколько меньшей твердостью (5-6) и слабым зеленоватым оттенком. Под микроскопом в полированных шлифах марказит ясно отлича-

ется от пирита своей анизотропностью.

Пентландит - $[\text{Fe},\text{Ni}]_9\text{S}_8$. Сингония кубическая. Кристаллохимическая структура сложная. Пентландит редко образует кристаллы. Обычно он присутствует в виде выделений неправильной формы в массе пирротина, от которого его трудно отличить.

Цвет бронзово-желтый, несколько светлее, чем у пирротина. Черта зеленовато-серая. Блеск металлический. Твердость - 3-4. Растворяется в азотной кислоте, окрашивая раствор в зеленый цвет. При добавлении диметилглиоксима раствор окрашивается в малиново-розовый цвет.

Пентландит - главный промышленный минерал никеля. Этот металл в основном выплавляется из пентландит-пирротиновых руд.

Никель используется в виде специальных сплавов для различных отраслей машино- и приборостроения. Весьма важно его применение в качестве антикоррозийного покрытия, а также для изготовления высококачественных броневых сталей.

Кобальтин - CoAsS . Сингония кубическая, кристаллохимическая структура весьма напоминает структуру пирита. Как и пирит, кобальтин часто встречается в виде кристаллов кубического, октаэдрического и пентагон-додекаэдрического облика. Часты скопления зернистых масс.

Цвет минерала стально-белый, с характерным розовым оттенком. Черта темно-серая. Блеск металлический, твердость высокая для сульфидов (5-6). В азотной кислоте растворяется, окрашивая раствор в розовый цвет.

Кобальтин - один из основных промышленных минералов кобальта, который имеет важное значение как легирующий металл при изготовлении специальных сталей, очень твердых и стойких к большим температурам. Кобальт как химический элемент и в виде сплавов используется в некоторых новых отраслях промышленности .

Арсенопирит - FeAsS . Сингония моноклинная. Кристалло-химическая

структура сложная. Минерал часто встречается в виде хороших кристаллов призматического облика, более или менее вытянутых вдоль третьей оси, или псевдобипирамидальных кристаллов, образованных равномерным развитием ромбических призм первого и третьего рода. Для граней призм первого рода типична вертикальная штриховка (рис.40).

Цвет стально-серый, блеск металлический, черта темно-серая. Твердость около 6, с трудом разлагается азотной кислотой. При ударе издает характерный запах чеснока.

Арсенопирит - основной источник получения мышьяка, который используется для изготовления соединений, применяемых в различных отраслях химической промышленности.

В арсенопирите содержится большое количество элементов-примесей: Ni, Bi, Ag, Au и особенно Co. В некоторых случаях содержание кобальта настолько велико, что выделяют особые минералы: данаит (3-9% кобальта), глаукодот (9-18% кобальта).

ГАЛОИДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Эти минералы представляют собой соли хлористоводородной и других галоидоводородных кислот. В составе солей преобладают химические элементы I и II групп таблицы Д.И.Менделеева. Широкое распространение имеют лишь отдельные хлориды и фториды. Большая часть галоидных минералов встречается редко.

Кристаллохимическая структура этих минералов основана на ионной связи. Ионы в этих структурах очень слабо поляризованы.

Галит - NaCl. Сингония кубическая. В кристаллохимической структуре минерала шесть катионов натрия окружают анион хлора.

Кристаллы галита встречаются довольно часто, они имеют кубический облик. Однако чаще минерал образует рыхлые зернистые скопления или

плотные массивные пласты (каменная соль).

Абсолютно чистый минерал бесцветен, но благодаря различным примесям может иметь серый, красноватый или даже бурый цвет. Твердость - 2, спайность совершенная по {100}. Легко растворяется в воде.

Галит используется как пищевой продукт, сырье для химической промышленности (изготовление соляной кислоты, хлорной извести и других соединений), в электротехнике и др.

Сильвин - KCl . Сингония кубическая. Кристаллохимическая структура аналогична структуре галита. Обычно встречается в виде зернистых масс, но иногда обнаруживаются кубические кристаллы. Цвет часто красный, что обусловлено примесью тонкодиспергированного гематита. Твердость - 1,5-2, спайность совершенная по кубу. Легко растворяется в воде. От галита отличается горьким вкусом.

Сильвин исключительно важный вид минерального сырья, так как он - исходный продукт для получения калийных удобрений и различных химических препаратов. Основная масса калия используется в сельском хозяйстве, меньшая - в химической, легкой и медицинской промышленности, в стекольном производстве.

Карналлит - $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$. Сингония ромбическая. Образует землистые массы. Твердость - 2-3, спайность отсутствует. Цвет часто красный благодаря примесям гидрооксид железа, из-за чего этот минерал иногда ошибочно принимают за сильвин. Является сырьем для получения калия и магния. Магний в виде металлических сплавов с алюминием используется в авиационной промышленности.

Флюорит (плавиковый шпат) - CaF_2 . Сингония кубическая. В кристаллохимической структуре катион восемью анионами фтора, а каждый анион фтора - четырьмя катионами кальция. Часто встречаются хорошо образованные кристаллы кубического или октаэдрического облика (рис.41) и

зернистые массы. Оригинальную разновидность представляют землистые скопления (ратовкит) в доломитизированных известняках.

Кристаллы флюорита прозрачны и обычно окрашены в желтые, зеленые, голубые, фиолетовые тона. Интенсивная фиолетовая окраска возникает под воздействием радиоактивных излучений. Твердость - 4. Минерал хрупок и обладает совершенной спайностью по {111}. При облучении флюорит испускает световые лучи, светится фиолетовым, синим и зеленоватым цветом. Указанное явление, обнаруженное впервые именно на этом минерале, получило название флюоресценции. Минерал начинает светиться также при нагревании (термолюминесценция).

Характерная особенность флюорита - наличие изоморфных примесей редкоземельных элементов и иттрия благодаря близким размерам ионных радиусов этих химических элементов, с одной стороны, и кальция - с другой. В случае замещения значительной части кальция образуются редкоземельные минералы (иттрофлюорит, флюоцерит и др.).

Флюорит используется преимущественно в металлургии для получения легкоплавких шлаков, а также в химической промышленности для изготовления фтористых соединений, в частности плавиковой кислоты. Крупные бесцветные кристаллы флюорита (так называемый оптический флюорит) применяются для изготовления линз в оптических приборах.

ОКИСЛЫ И ГИДРООКИСЛЫ

К этой группе природных химических соединений относится большое число представителей. Более 40 химических элементов встречается на Земле в виде соединений этого типа. Общая масса минералов оксидов составляет около 17% всей массы земной коры. При этом большая часть этого количества представлена соединениями кремния (12,6%) и железа (3,9%). В меньшем, но также в значительном количестве имеются оксидов и гидроксиды

алюминия, марганца, титана. Кроме соединений этих металлов, рассмотрим и некоторые менее распространенные минералы, являющиеся ценным минеральным сырьем.

Для минералов этой большой группы характерна ионная связь в кристаллической структуре, причем основным анионом является O^{2-} и иногда $(OH)^{1-}$. Величины радиусов этих ионов почти равны.

Оксиды и гидроксиды кремния. Кварц - SiO_2 Кристаллохимическая структура характеризуется сложным каркасом тетраэдрических группировок анионов кислорода (O^{2-}), между которыми располагается катион кремния (Si^{4+}). Подробнее такие структуры описаны в разделе, посвященном силикатам. В низкотемпературной модификации кварца каркас более плотный, в высокотемпературной - менее плотный. Низкотемпературная модификация, устойчивая при температуре ниже $+573\text{ }^\circ\text{C}$ (при давлении в 1 атм.), называется α -кварцем. Этот минерал весьма широко распространен, и именно он известен под названием кварца. Он кристаллизуется в тригональной сингонии (высокотемпературный β -кварц кристаллизуется в гексагональной сингонии). Кристаллы кварца имеют призматический облик благодаря развитию граней призмы $\{1010\}$, которые обычно несут горизонтальную штриховку. Головки кристаллов образованы главным образом гранями ромбоэдра $\{1011\}$ и менее развитыми гранями тригональной дипирамиды и тригонального трапецоэдра (рис.42,а).

Известны псевдоморфозы кварца по β -кварцу. Они имеют совершенно иной, бипирамидальный облик (рис.42,б).

Кварц - один из наиболее распространенных породообразующих минералов. Он входит в состав многих горных пород, часто образует жилы, рыхлые скопления скатанных зерен и др.

Твердость минерала - 7. Спайность не выражена. Излом раковистый. Блеск стеклянный. Цвет разнообразный, хотя преобладают бесцветные и мо-

лочно-белые разности. Выделяют следующие разновидности кристаллов кварца: горный хрусталь - бесцветный водяно-прозрачный, аметист - фиолетовый, раухтопаз - дымчатый, морион — черный, цитрин — золотистый.

Кварц часто содержит мельчайшие включения других минералов, что вызывает красивую игру цветов. Таковы авантюрин (включения слюды и гематита), кошачий глаз (включения асбеста). Распространенный молочно-белый цвет кварца обусловлен обильными, но очень мелкими (обычно сотые доли миллиметра) пустотами, занятыми водным раствором и газом.

Кварц не растворяется кислотами, за исключением плавиковой.

Скрытокристаллические разновидности оксида кремния, обладающие волокнистым строением, называются **халцедоном** и кварцином (последний встречается значительно реже). Цветные разновидности халцедона многообразны: красные разных оттенков - сердолик, зеленоватый - плазма, желтый - восковой халцедон, белый фарфоровидный — кахолонг. Концентрически зональные разноцветные стяжения халцедона называются **агатами**; непрозрачные, с различными примесями, обычно бурого и темно-серого цвета скопления халцедона - кремнями. Кремьень сыграл важную роль в развитии человека - из него изготовляли каменные орудия.

Кварц широко используют как минеральное сырье. Бесцветные кристаллы применяются для изготовления оптических приборов, крупные кристаллы (пьезокварц) - в радиотехнической промышленности. Из кварца и халцедона изготовляют детали точных приборов и механизмов. Этот минерал очень широко используют в стекольной промышленности, из кварцевого стекла готовят специальную химическую посуду, кварцевые лампы и др.

Гидроксиды кремния в природных условиях встречаются в виде **опала** - $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Он имеет аморфное строение. Содержание воды меняется от

30 и более до 4-5%. Сильно обогащенные водой разности режутся ножом, однако обычно опал имеет твердость 5-6.

В кислотах минерал не растворяется (за исключением H_2SO_4), но разлагается КОН.

В опале обычно содержится большое количество примесей. В зависимости от них окраска меняется от бесцветной до зеленого, красного, черного цвета. В бесцветных или слабоокрашенных разностях заметна опалесценция (внутреннее рассеивание света). Драгоценные разности, обладающие особенно красивой опалесценцией, называются благородным опалом.

Оксиды и гидроксиды железа. Гематит (от греческ. *гематикос* - кровавый) - Fe_2O_3 . Имеется несколько синонимов минерала - **железный блеск, красный железняк** и др. Сингония тригональная. Кристаллохимическая структура в схеме представляет собой следующее. Среди ионов кислорода, находящихся в плотнейшей упаковке, в октаэдрических пустотах между шестью кислородными анионами находятся катионы трехвалентного железа. Катионами занято $2/3$ октаэдрических пустот. Каждый ион железа окружен шестью ионами кислорода, и каждый ион кислорода связан с четырьмя ионами железа.

Кристаллы имеют пластинчатый, реже ромбоэдрический облик. Весьма характерны концентрические агрегаты пластинчатых кристаллов («железная роза»), конкреции радиально-волокнистые и концентрические, натечные формы. Часто мелкие выделения или кристаллики гематита насыщают другие минералы, окрашивая их в красный цвет. Минерал может содержать неопределенное количество воды, тогда его называют **гидрогематитом** - $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$.

Характерный признак минерала, от которого он получил свое название, вишнево-красный цвет его черты. Плотные разновидности имеют железно-черный цвет, часто с металловидным блеском; рыхлые землистые об-

разования красные. Твердость хорошо окристаллизованных разностей довольно высокая (около 6). Медленно растворяется в соляной кислоте.

Гётит (в честь В. Гёте) - FeOОН . Сингония ромбическая. Предполагают, что в кристаллохимической структуре гётита все октаэдрические пустоты заняты ионами трехвалентного железа. Каждый ион железа связан с шестью ионами кислорода, каждый ион кислорода - с тремя ионами железа. Ионы водорода (протоны) могут располагаться между двумя ионами кислорода.

Кристаллы имеют призматический вытянутый облик, очень редки. Минерал образует натечные формы радиально-волокнистого строения, концентрического строения конкреции, шлаковидные и землистые массы.

Очень часто в гётите присутствует непостоянное количество сорбированной воды (**гидрогётит** - бурый железняк - $\text{FeOОН} \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

Цвет гидрогётита и гётита ржаво-бурый, черта той же окраски, но более светлая. У кристаллических разностей совершенная спайность по (010) и твердость около 5.

Гематит и гидрогематит (красный железняк), гётит и гидрогётит (бурый железняк), магнетит (магнитный железняк) - это минералы, слагающие основную массу руд железа. Значение железа для современной цивилизации пока несравнимо ни с каким другим металлом. Черная металлургия - основа для других отраслей народного хозяйства. Успешные геологические работы по выявлению новых месторождений железных руд обеспечили быстрые темпы развития тяжелой индустрии нашей страны.

Магнетит (магнитный железняк) - $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$. Магнетит - пример двойного оксида. В строении этого минерала принимают участие два катиона - Fe^{2+} и Fe^{3+} . Сингония кубическая. Кристаллохимическая структура представляет собой каркас, состоящий из тетраэдрических и октаэдрических групп ионов кислорода, в которых расположены соответственно ионы трех-

валентного и двухвалентного железа. Кристаллы довольно часты, они имеют октаэдрический, реже ромбододекаэдрический облик (рис.43). Большой частью минерал образует зернистые массы и вкрапления.

В магнетитовых рудах часто присутствуют примеси титана, хрома, ванадия, никеля, марганца. Разновидности, содержащие титан в количестве нескольких процентов, называются титано-магнетитами.

Сложные оксиды железа и других металлов. Хромистый железняк. Этим названием обозначают целую серию минералов. Чистый хромовый минерал этой группы - **хромит** (FeCr_2O_4) - встречается довольно редко; он типичен для метеоритов. Обычно в минералах этой группы присутствует значительное количество магния и алюминия, изоморфно замещающих железо и хром.

Сингония этих минералов кубическая. Их кристаллохимическая структура аналогична структуре магнетита. Хромитовые железняки образуют сплошные массы, реже мелкие октаэдрические кристаллы.

Цвет черный, блеск металлоидный, черта бурая. Твердость около 6. В кислотах не растворяются.

Хром имеет значение главным образом как легирующий металл. Хромовые стали обладают высокой твердостью и используются для изготовления инструментов и деталей машин. Сплавы железа, никеля и хрома (нихром) употребляют в электротехнике. Благодаря высокой температуре плавления (около $+2000^{\circ}\text{C}$) хромистые железняки используют в качестве естественного огнеупорного материала. Соединения хрома применяют в химической промышленности для изготовления красок, в кожевенной промышленности для выработки прочной хромовой кожи.

Ильменит - FeTiO_3 . Сингония тригональная. Кристаллохимическая структура того же типа, что у гематита, но место трехвалентных ионов железа поочередно занимают ионы двухвалентного железа и четырехвалентного

титана. Кристаллы редки, они имеют толстотаблитчатый облик. Обычно встречается в виде вкраплений.

Цвет железо-черный, блеск полуметаллический, черта черная, иногда буроватая. Твердость около 6. В химическом составе обнаруживаются значительные примеси магнезия и трехвалентного железа. Является промышленным минералом титана.

Оксиды и гидроксиды алюминия. Корунд - Al_2O_3 . Тригональная сингония. Кристаллохимическая структура в схеме представляет следующее. В октаэдрических пустотах между шестью кислородными ионами находятся катионы алюминия. Каждый ион алюминия окружен шестью ионами кислорода, и каждый ион кислорода связан с четырьмя ионами алюминия. Кристаллы имеют призматический или бипирамидальный облик. Благодаря развитию граней бипирамид кристаллы часто принимают характерный бочонковидный облик.

Цвет обычно синевато-серый. Блеск стеклянный. Среди драгоценных разновидностей наиболее известны рубин (красный) и сапфир (синий). Твердость очень высокая (9), спайность не выражена. Корунд применяется как абразив, драгоценные разновидности - для изготовления ювелирных украшений.

Бёмит - $AlO(OH)$. Сингония ромбическая. В кристаллохимической структуре предполагают наличие двойных листов кислородных ионов, внутри которых располагаются ионы алюминия, находящиеся в шестерной координации с ионами кислорода. Эти листы соединяются водородными связями. Бёмит редко встречается в виде мелких пластинчатых кристаллов, обычно образует сплошные массы.

Минерал белый, блеск стеклянный. Твердость - 3,5. Спайность совершенная по второму пинакоиду (параллельно расположению кислородно-алюминиевых слоев), но в скрытокристаллических массах незаметна.

Гидраргиллит (гиббсит) - $Al(OH)_3$. Сингония моноклинная. Кристаллохимическая структура слоистая. Каждый слой состоит из плоских листов, сложенных ионами гидроокисла, между которыми в октаэдрических пустотах располагаются ионы алюминия. Слои ориентированы параллельно базопинакоиду. Облик кристаллов таблитчатый. Как правило, минерал образует не одиночные кристаллы, а тонкочешуйчатые массы, лучистые агрегаты и вместе с гидроксидами железа слагает округлые конкреции.

Цвет белый, благодаря примесям может быть окрашен в зеленоватые и красные тона. Блеск стеклянный. Твердость низкая (2,5-3). Спайность весьма совершенная по (001), что обуславливает характерную чешуйчатость минерала. Смоченный раствором азотнокислого кобальта, после прокаливания на угле окрашивается в ярко-синий цвет.

Гидраргиллит один или с бёмитом и диаспором входит в состав бокситов, являющихся основным сырьем для извлечения металлического алюминия.

Бокситы - сложная смесь минералов гидроксидов алюминия и железа, а также глинистых минералов. Цвет бокситов белый, желтый, красно-бурый. Бокситы представлены рыхлыми глинистыми массами, оолитами из гидроксидов железа и алюминия, иногда уплотненными породами.

Алюминий - важнейший металл современной промышленности. Многие отрасли промышленности возникли исключительно в результате использования алюминия, например самолетостроение. Этот металл все больше применяется в машиностроении, электропромышленности, на транспорте и в строительной индустрии. Важное значение имеет алюминий для создания систем электропередач на огромной территории нашей страны.

Оксиды и гидроксиды марганца. Природные оксиды марганца представлены разнообразными минералами, которые состоят главным образом из окиси и двуокиси марганца, находящихся в разном соотношении. Поэтому

им свойственны некоторые общие диагностические признаки - черный или черно-бурый цвет, реакция с перекисью водорода с выделением кислорода и соляной кислотой с выделением хлора. Кристаллохимическая структура большей части природных окислов марганца недостаточно изучена. Кратко рассмотрим некоторые из наиболее распространенных минералов этой группы.

Псиломелан - $m\text{MnO}_2 \cdot n\text{MnO} \cdot p\text{H}_2\text{O}$, $m > n$. Химический состав очень изменчив, но окись марганца всегда присутствует в подчиненном количестве. Постоянно содержатся примеси бария, кобальта, меди, цинка и др. Образует землистые скопления, натечные формы, округлые конкреции, дендриты.

Цвет черный, иногда с буроватым оттенком. Черта черная. Твердость сильно колеблется от 1-2 для землистых разновидностей до 5-6 для плотных.

Пиролозит - MnO_2 . Сингония тетрагональная. Кристаллы очень редки. Образует плотные и рыхлые скопления, натечные массы, конкреции. Величина конкреций достигает 20 см в диаметре.

Цвет железо-черный. В кристаллических массах заметен металлический блеск. Черта черная. Как и у псиломелана, твердость значительно колеблется. В кристаллических зернах видна совершенная спайность по (110).

Эти минералы образуют промышленные руды марганца. Марганец - важный элемент черной металлургии. Он играет ответственную роль в технологии сталелитейного дела: входит в состав прочных и устойчивых сортов стали. Широко распространенные изделия из нержавеющей стали изготавливают из марганцовистых сталей.

Наша страна имеет уникальные по своим масштабам месторождения марганцевых руд, по запасам которых занимает первое место в мире.

Оксиды титана. Рутил - TiO_2 . Сингония тетрагональная. В кристаллохимической структуре каждый ион титана окружен шестью ионами кисло-

рода, а каждый ион кислорода связан с тремя ионами титана. Рутил встречается преимущественно в форме кристаллов. Облик кристаллов призматический, тонкопризматический до игольчатого и волосовидного. Игольчатый рутил называют с а г е н и т о м . Волосовидные кристаллы рутила в кристаллах кварца известны под названием «волосы Венеры». Характерны коленчатые и сердцевидные двойники (рис.44). В результате двойникования сагениит образует характерную сетку иголочек, пересекающихся под углом 60° .

Цвет от коричневого до темно-бурого и красного. Твердость - 6-6,5. Блеск алмазный. Спайность по $\{110\}$. В кислотах не растворяется. Обычно присутствие примеси железа, олова, хрома, ванадия. Рутил с обильными включениями ильменита имеет черный цвет и называется н и г р и н о м .

Рутил более богатое, чем ильменит, сырье для получения титана (см. выше). Титан употребляют для изготовления высокосортных сталей, используют в электронной технике, соединения титана применяют в химической промышленности в качестве катализаторов. Окись титана - лучшая белая краска.

Коллоидные и плохо раскристаллизованные гидроокиси титана присутствуют в виде постоянной примеси в бокситах.

Скопления скрытокристаллического рутила в смеси со столь же мелкими выделениями кварца, опала, глинистых минералов называются л е й - к о к с е н о м . В нем содержатся значительные примеси редких элементов - тантала, ниобия и др. Лейкоксен иногда образует скопления, представляющие промышленный интерес как титановые руды.

Оксид олова - **касситерит** (от греч. *касситерос* - олово) - SnO_2 . Сингония тетрагональная. Кристаллохимическая структура аналогична структуре рутила. Минерал образует вкрапления, зернистые массы, хорошо выраженные кристаллы, мелкие выделения неправильных очертаний, радиально-лучистые агрегаты, даже желваки колломорфной текстуры (так называемое

деревянистое олово). Облик кристаллов пирамидально-призматический, короткостолбчатый, призматический до игольчатого. Основные формы {111}, {110}, {101}, {100} и {010}. Отдельные кристаллы достигают величины 10 см. Характерны двойники по (101), коленчатые двойники, как у рутила (рис.45), и более сложные, состоящие из трех, четырех и пяти кристаллов.

Касситерит содержит большое количество разных примесей - железа, марганца, титана, ниобия, тантала, вольфрама, меди, цинка, свинца, циркония, галлия, германия, скандия, индия и др.

Цвет меняется от светло-коричневого до черного (в прозрачных шлифах под микроскопом бурого цвета). Темная окраска характерна для разностей, богатых железом, марганцем, титаном. Блеск в изломе смоляной, на гранях - алмазный, в темных разностях - полуметаллический.

Твердость -6-7, спайность несовершенная по {100}. Удельный вес высокий (около 7). В кислотах не растворяется. Характерная диагностическая реакция - «оловянное зеркало»: кристалл касситерита на цинковой пластинке в капле HCl в результате восстановления водородом покрывается тонким налетом металлического олова.

Касситерит имеет весьма важное значение, так как он основной минерал, образующий руды олова¹. Человек использует олово в течение нескольких тысяч лет. Этот металл вместе с медью дает сплав - бронзу, которая прекрасно отливается и обрабатывается, и в то же время тверже меди. Бронза служила основным металлом для многих цивилизаций. В настоящее время бронзу применяют для изготовления деталей машин и приборов. Олово используют преимущественно в качестве антикоррозийного покрытия жести, основной потребитель которой - консервная промышленность.

¹ Из других минералов лишь один станнин (Cu_2FeSnS_4) используют для извлечения олова, причем экономическое значение этого минерала несравнимо меньше касситерита.

КИСЛОРОДНЫЕ СОЛИ

К соединениям этого типа относится около 2/3 обнаруженных к настоящему времени минералов.

Общей чертой разнообразных природных соединений этого типа является наличие в их кристаллохимической структуре комплексных анионов - кислотных радикалов. Кислотные радикалы имеют определенное строение. Катион с высокой валентностью очень прочно связывается с ионами кислорода. Это сопровождается сильной поляризацией ионов. Так, ионные радиусы кислорода O^{2-} и углерода C^{4+} соответственно составляют 1,36 Å и 0,18 Å. В то же время расстояние между ионами углерода и кислорода в радикале угольной кислоты $[CO_3]^{2-}$ равно 1,26. Схема строения этой ионной группы изображена на рис.46.

Кислотные радикалы (комплексные ионы) представляют собой очень прочные ионные группировки, которые не разрушаются даже при растворении соединений. Поэтому они в кристаллохимической структуре имеют значение самостоятельных единиц.

Анионы типа $[CO_3]^{2-}$ имеют форму плоских треугольников или очень тупых пирамид, в центре которых расположен катион. Анионы типа $[SO_4]^{2-}$ представляют собой тетраэдрическую группировку поляризованных ионов кислорода с ионами шестивалентной серы в центре.

Так как конфигурация комплексных анионов сложная, а размеры их относительно крупные, то устойчивые кристаллохимические структуры в слоях кислородных кислот могут возникать только при соединении кислотных радикалов с катионами, имеющими относительно большие ионные радиусы. Например, сульфатный анион $[SO_4]^{2-}$ образует устойчивые соединения с двухвалентными катионами, обладающими наибольшими величинами ионных радиусов, - катионами свинца, бария и стронция. Катионы с малыми ионными радиусами могут образовывать лишь водные сульфаты, в кристал-

лохимической структуре которых молекулы воды как бы выполняют избыточное пространство. Эти природные соединения неустойчивы, легко растворяются. Таковы сульфаты марганца, магния, двухвалентного железа, меди, цинка и др.

Карбонаты

Карбонаты широко распространены в земной коре. Карбонатный анион $[\text{CO}_3]^{2-}$ образует сравнительно устойчивые соединения с двухвалентными катионами, имеющими средние и большие величины радиусов. Особенно распространены карбонаты магния и кальция.

Карбонаты металлов с величиной ионного радиуса менее 1 \AA кристаллизуются в тригональной сингонии, карбонаты крупных катионов (стронция, бария, свинца) кристаллизуются в ромбической сингонии. Карбонаты кальция, ионный радиус которого имеет величину около 1 \AA , известны как в тригональной, так и в ромбической модификации. В кристаллохимических структурах, как тригональных, так и ромбических карбонатов, карбонатный ион связан с шестью ионами кальция, но структура ромбических карбонатов более плотная.

Все **тригональные карбонаты** характеризуются совершенной спайностью по ромбоэдру, что обусловлено особенностями их кристаллохимического строения. Из минералов этой группы наиболее важное значение имеет **кальцит** - CaCO_3 . Облик кристаллов обычно ромбоэдрический и скаленоэдрический (рис.47). Часто встречаются крупные, прекрасно образованные прозрачные кристаллы и их друзы (**исландский шпат**). Под микроскопом видны полисинтетические двойники по граням ромбоэдра.

Кальцит - один из наиболее распространенных породообразующих минералов. Он образует большие массы хорошо окристаллизованных мраморов или скрытокристаллических известняков.

Чрезвычайно характерны псевдоморфозы кальцита по остаткам морских животных. Некоторые горные породы полностью состоят из таких образований. Встречается также в виде натечных форм - плотных, с радиально-концентрической структурой (сталактиты и сталагмиты, пещерный жемчуг) и рыхлых, ноздреватых (известковый туф).

В кальците обычно имеется большое количество примесей, как изоморфных (марганец, магний, железо, стронций, свинец, барий, церий, иттрий), так и механических. Последние влияют на цвет минерала. Обычно кальцит бесцветен (прозрачный) или молочно-белый. Примеси окрашивают в серый, черный, желтый и красный цвета. Блеск стеклянный, на плоскостях спайности бывает перламутровым. Под действием катодных лучей люминесцирует ярким цветом желтых или красных тонов.

Твердость -3. Спайность совершенная по ромбоэдру {1011}. Легко растворяется с бурным выделением пузырьков углекислого газа даже в разбавленной соляной кислоте.

Используется как поделочный и облицовочный материал (мрамор), в металлургии - в качестве флюса при доменной плавке, в химической и строительной промышленности - при производстве стекла. Бесцветные прозрачные кристаллы исландского шпата употребляют для изготовления некоторых оптических приборов, в частности поляризационных микроскопов.

Магнезит - $MgCO_3$. Облик кристаллов ромбоэдрический, но обычно минерал образует не кристаллы, а зернистые или скрытокристаллические фарфоровидные массы.

Цвет белый, с серым или желтоватым оттенком. Блеск стеклянный, в скрытокристаллических массах - матовый. Совершенная ромбоэдрическая спайность проявляется только в кристаллическом магнезите, для фарфоровидных разновидностей типичен раковистый излом. В соляной кислоте растворя-

ется очень медленно, без вскипания.

Магнезит используется как сырье для изготовления огнеупорных материалов, необходимых в металлургическом производстве. Магнезит - один из основных минералов магнезия, который в виде металлических сплавов с алюминием используется в авиационной промышленности.

Доломит - $\text{Ca, Mg}[\text{CO}_3]_2$. В кристаллохимической структуре имеет место чередование ионов кальция и магнезия. Облик кристаллов ромбоэдрический. Кристаллы не бывают такими крупными, как у кальцита, нередко грани деформированы, изогнуты. Образует обычно мощные пласты, часто переслаивающиеся с известняками, глинами, гипсами и ангидритами.

Даже при мелкокристаллическом строении масс доломита каждое зерно минерала обладает ясными ромбоэдрическими очертаниями, что хорошо заметно в прозрачных шлифах под микроскопом.

Цвет светло-серый, в зависимости от примесей может быть с желтым, зеленым или красным оттенком. Блеск стеклянный. В холодных кислотах растворяется медленно.

Основное практическое применение доломита связано с металлургией (флюсы) и производством огнеупоров. Используется также в качестве строительного материала и для изготовления цемента.

Сидерит (от греческ. *сидерос* — железо) - FeCO_3 . Облик кристаллов ромбоэдрический, часто кристаллы деформированы. Образует зернистые массы; характерны шаровидные конкреции радиально-лучистого строения (сферосидерит).

Цвет желтовато-белый. На дневной поверхности быстро приобретает ржавый цвет. В холодной кислоте растворяется слабо. При прокаливании становится темно-бурым. Крупные скопления сидерита используют как железную руду. В некоторых рудных месторождениях встречается минерал анкерит, являющийся карбонатом кальция, магнезия и железа. В этом минерале

содержание катионов меняется в широком диапазоне.

Смитсонит - $ZnCO_3$. Кристаллы редки, характерны различные натечные формы (корки, гроздевидные агрегаты). Цвет белый, благодаря примеси меди и железа может иметь соответственно зеленоватый или буроватый оттенок.

Ромбоэдрическая спайность в скрытокристаллических образованиях не выражена. Минерал легко растворяется и в случае сильно пористого, землистого сложения вскипает в холодной соляной кислоте. Смитсонит - самый твердый карбонат (твердость - 5). Важным диагностическим признаком является также его высокий удельный вес (4,5).

Скопления смитсонита в значительных количествах имеют важное промышленное значение, так как содержание цинка в них значительно больше, чем в сульфидных рудах.

Ромбические карбонаты. Арагонит - $CaCO_3$. Облик кристаллов удлиненно-призматический до игольчатого. Главные формы - призма $\{110\}$, второй и третий пинакоиды. Иногда присутствуют грани призмы $\{011\}$, образующие головку шестоватых кристаллов. Часты двойники по граням призмы (110), иногда тройники, придающие псевдогексагональный облик кристаллов. Характерны радиально-лучистые агрегаты, изогнутые стеблевидные кристаллы, натечные формы и оолиты. Раковины моллюсков сложены в основном арагонитом. Разновидность арагонита - важнейшая составная часть жемчуга.

Цвет арагонита обычно белый, но из-за примесей может иметь различные оттенки. Твердость - 3,5-4. Спайность не выражена. В кислотах растворяется так же, как и кальцит.

Два других представителя ромбических карбонатов - стронцианит ($SrCO_3$) и виверит ($BaCO_3$) - встречаются редко. Стронцианит образует тонкоигольчатые или короткопризматические кристаллы и по внешнему виду

очень напоминает арагонит. Витерит образует волокнистые и почковидные агрегаты, реже кристаллы бипирамидального облика.

Церуссит - PbCO_3 Кристаллы имеют бипирамидальный псевдогексагональный облик (рис.48) в результате развития граней бипирамиды $\{111\}$ и призмы $\{021\}$ или таблитчатый благодаря развитию граней пинакоидов $\{100\}$ и $\{010\}$. Обычно образует зернистые или скрытокристаллические массы.

Цвет белый, с различными оттенками в зависимости от количества и состава примесей. Кристаллы имеют алмазный блеск.

Твердость - 3- 3,5. Спайность плохо выражена, удельный вес высокий (6,5). Бурно разлагается в разбавленной азотной кислоте.

Церусситовые руды - источник получения свинца.

Природные карбонаты меди встречаются только в виде основных солей, т. е. солей, содержащих ионы $(\text{OH})^{1-}$, которые нейтрализуют избыточный заряд катионов. Такими минералами являются малахит ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) и азурит ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$).

Малахит кристаллизуется в моноклинной сингонии, но хорошо образованные кристаллы - редкость. Обычно встречается в натечных формах с концентрически-зональным или радиально-концентрическим строением.

Цвет зеленый, блеск шелковистый, черта бледно-зеленая. Твердость - 3,5-4. В соляной кислоте растворяется с бурным выделением углекислого газа.

Из плотных разностей, обладающих колломорфным строением, изготовляют различные ювелирные изделия, предметы искусства.

Азурит (от франц. *лазур* — лазурный, голубой). Кристаллы моноклинной сингонии имеют таблитчатый или коротко-столбчатый облик. Минерал встречается в виде друз и щеток мелких кристаллов, зернистых и скрытокристаллических масс. Зернистые образования имеют темно-синий

цвет, землистые скопления более светлые. Черта голубая. Блеск стеклянный. Твердость - 3,5-4. Растворяется с шипением в соляной кислоте.

Сульфаты

Природные соли серной и сернистой кислот весьма многочисленны, однако большая их часть характеризуется малой устойчивостью, небольшой твердостью, легкой растворимостью. Это объясняется крупными размерами комплексного аниона $[\text{SO}_4]^{2-}$, который образует устойчивые кристаллохимические структуры лишь с катионами, обладающими большими ионными радиусами. Как видно на рис.49, анион $[\text{SO}_4]^{2-}$ имеет следующее строение: вокруг шестивалентного иона серы S^{6+} в тетраэдрическом расположении находятся четыре иона кислорода O^{2-} . В результате комплекс имеет две отрицательные валентности. Величина радиуса иона S^{6+} равна 0,29 Å, иона O^{2-} = 1,36 Å. Структуры сульфатов, катионы которых имеют небольшие радиусы, могут образовываться только при наличии молекул воды, которые располагаются в свободном пространстве. Сульфаты катионов с крупным радиусом (стронций - 1,20 Å, свинец - 1,26 Å, барий - 1,3 Å) в виде водных сульфатов не встречаются.

Сульфаты двухвалентных и одновалентных металлов с большим ионным радиусом. Целестин - SrSO_4 . Кристаллохимическая структура минерала представляет собой каркас из тетраэдрических групп $[\text{SO}_4]^{2-}$, которые соединяются с ионами стронция. Сингония ромбическая. Облик кристаллов призматический благодаря развитию ромбических призм $\{011\}$ и $\{110\}$ или таблитчатый по второму пинакоиду. Часто встречаются друзы мелких кристаллов, натечные образования, стяжения радиально-лучистого строения.

Цвет чистых разновидностей целестина голубовато-светло-серый. Благодаря светло-голубому цвету и прозрачности кристаллов этот минерал получил

свое название (от лат. *целестис* - небесный). Однако благодаря наличию механической примеси встречаются целестины буроватого и красноватого цвета. Блеск стеклянный. Твердость - 3-3,5. Спайность совершенная по второму пинакоиду {010}. Растворяется в крепкой серной кислоте. Окрашивает пламя в карминно-красный цвет.

Целестин - основной минерал стронция, который применяется в пиротехнике (фейерверки, сигнальные ракеты, трассирующие пули), химической и фармацевтической промышленности.

Барит (от греч. *барис* — тяжелый) - $BaSO_4$. Кристаллохимическая структура подобна структуре целестина. Сингония ромбическая. По облику кристаллы барита очень напоминают целестин: призматические, образованные гранями ромбических призм или таблитчатые по {010}. Образует землистые массы, корки, натёки. Очень характерны конкреции.

Кристаллы чистого барита водяно-прозрачные, но благодаря механическим примесям минерал обычно окрашен в различные цвета: бурый (глинистые минералы), красный (гидроокислы железа и некоторые глинистые минералы), черный (битуминозные вещества). Блеск стеклянный. Твердость - 3-3,5. Спайность по {010} совершенная.

Растворяется в концентрированной серной кислоте. Характерный диагностический признак - большой удельный вес (4,7). Раньше этот минерал даже называли «т я ж е л ы й ш п а т ».

В барите присутствуют в качестве изоморфной примеси кальцит, стронций, свинец, радий. Барит, сильно обогащенный стронцием, называют баритоцелестином.

Барит применяют в качестве утяжелителя глинистых растворов при бурении нефтяных скважин, используют в пиротехнике, для изготовления некоторых химических препаратов и белых красок, в фармацевтике. Барит непрозрачен для рентгеновских лучей, поэтому в рентгеновских лаборатори-

ях делают специальную баритовую штукатурку.

А н г л е з и т - PbSO_4 . Кристаллохимическая структура и сингония как у барита и целестина. Кристаллы имеют таблитчатый облик по $\{010\}$. Обычно образует щетки мелких кристаллов, пленки на галените, рыхлые скопления.

Твердость - 2,5-3, спайность плохо выражена. Минерал весьма хрупок. Бесцветен, белый или светло-серый. Окислы железа окрашивают его в бурый цвет. Блеск на гранях алмазный. В отличие от барита и целестина растворяется в растворе едкого калия.

Сульфаты кальция. Ион кальция обладает несколько меньшим радиусом, чем ионы стронция, свинца и бария. Поэтому в природе встречаются как сульфаты кальция, в структуру которого входят молекулы воды, так и безводный сульфат.

Г и п с - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. В кристаллохимической структуре выделяются двойные листы, состоящие из тетраэдрических комплексов $[\text{SO}_4]^{2-}$, которые соединены между собой ионами кальция. Эти двойные листы связаны молекулами воды. Гипс кристаллизуется в моноклинной сингонии. Кристаллы образованы гранями пинакоида $\{010\}$ и призмы $\{110\}$, $\{111\}$ и др. Облик кристаллов обычно таблитчатый по $\{010\}$, реже призматический. Очень характерны двойники по (100) в форме «ласточкиных хвостов» (рис.50).

Гипс встречается в виде кристаллов (часто величиной в несколько дециметров), друз различных сростков и агрегатов, а также в виде плотных масс. Оригинальной разновидностью является красивый волокнистый гипс с шелковистым блеском (**с е л е н и т**), служащий поделочным камнем на Урале.

Кристаллы гипса обычно водяно-прозрачны. Мелкокристаллические массы гипса имеют белый цвет или окрашены механическими примесями в черный, красный, бурый цвета. Блеск стеклянный, на плоскостях спайности с

перламутровым отливом. Твердость низкая (2). Спайность весьма совершенная по (010).

Гипс очень широко применяют в строительстве, используют для скульптурных работ и в медицине.

Ангидрит - CaSO_4 . Сингония ромбическая. Хорошо образованные кристаллы редки, они имеют тонкотаблитчатый облик. Обычно минерал образует мелкозернистые скопления, тонкие пропластки, мощные пласты.

Цвет белый, встречаются разноцветности с красноватым и зеленоватым оттенками. Блеск стеклянный. Твердость - 3-3,5. Совершенная спайность по трем пинакоидам - {100}, {010} и {001}. Слабо растворяется в соляной, лучше в серной кислоте.

Как и гипс, ангидрит используют преимущественно для строительства.

Сульфаты одновалентных и двухвалентных металлов с малым ионным радиусом. Кристаллохимическая структура этих минералов хорошо не изучена. Они легко растворяются в воде и очень хрупки.

Мирабилит - $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Моноклиновая сингония. Встречается исключительно в виде призматических кристаллов (рис. 50) и друз. Имеет вяжущий горько-соленый вкус. В сухом воздухе быстро теряет воду, в результате чего кристаллическая структура нарушается. Прозрачные кристаллы рассыпаются в тончайший белый порошок, состоящий из безводного тенардита Na_2SO_4 .

Мелантерит - $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Сингония моноклиновая. Облик кристаллов таблитчатый. Цвет светло-зеленый, блеск стеклянный. Кристаллы прозрачны. Твердость низкая (1,5-2), очень хрупок. Легко растворяется в воде. Вкус вяжущий. При добавлении в раствор аммиака выпадает зеленовато-серый осадок $\text{Fe}(\text{OH})_2$. В сухом воздухе теряет часть кристаллизационной воды и рассыпается в белый порошок.

Вольфраматы

Минералы этого класса немногочисленны. Несмотря на это, некоторые из них имеют важное практическое значение.

Вольфрамит - $(\text{Mn}, \text{Fe}) \text{WO}_4$. Кристаллохимическая структура минерала состоит из тетраэдрических группировок кислородных ионов с шестивалентным катионом вольфрама в центре, которые соединяются двухвалентными катионами. В качестве последних присутствуют марганец и железо, изоморфно замещающие друг друга. Чисто марганцевый представитель этого изоморфного ряда называют *г ю б н е р и т о м*, чисто железистый - *ф е р - б е р и т о м*. В качестве примеси присутствуют молибден, титан, ванадий, индий, скандий и др.

Сингония моноклиная. Кристаллы имеют толстотаблитчатый или призматический облик (рис.52). Кристаллы встречаются довольно часто, в том числе крупные, до нескольких дециметров в длину. Хорошо развиты грани форм $\{100\}$, $\{010\}$ и $\{110\}$, распространены двойники по $\{100\}$.

Вертикальные грани часто несут вицинальную штриховку.

Цвет вольфрамита буровато-черный (гюбнерит более светлый, с красноватым оттенком, ферберит металлический, черный). Черта бурая (у гюбнерита - светло-коричневая, у ферберита - темно-бурая). Блеск на плоскостях спайности алмазный.

Спайность совершенная по $\{010\}$. Твердость - 4,5-5,5. Удельный вес около 7 и выше. В кислотах не растворяется.

Вольфрамит и в несколько меньшей мере шеелит (CaNO_4) весьма ценные промышленные минералы, так как их скопления - основные источники вольфрама. Значение этого металла для народного хозяйства чрезвычайно велико. Он необходим при изготовлении твердых и самозакаливающихся сортов стали для быстрорежущих станков, для различных типов броневой стали. Вместе с хромом, кобальтом и другими металлами вольфрам входит в состав безжелезных сверхтвердых сплавов (победит и др.). Из вольфрама по-

лучают тончайшую проволоку, которая используется для изготовления электроламп. Вольфрам находит применение в электронике.

Фосфаты

Апатит - $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$. Кристаллохимическая структура минерала сложная. Комплексные анионы, представленные тетраэдрической группировкой ионов кислорода с пентавалентным катионом фосфора в центре, соединяются ионами кальция. В качестве добавочных анионов могут присутствовать F^{1-} , Cl^{1-} и $(\text{OH})^{1-}$.

Сингония гексагональная. Наиболее распространенный облик кристаллов призматический, в различной мере укороченный или удлиненный по оси С (рис.53). Головка кристаллов образована гранями пинакоида и различных гексагональных бипирамид. Апатит образует мелкозернистые скопления, скрытокристаллические выделения. Весьма характерны апатитовые конкреции радиально-концентрического строения, так называемые фосфориты (рис.54).

Цвет разностей апатита разнообразный: белый, серый, изумрудно-зеленый, желтый, бурый. Блеск стеклянный. Твердость - 5. Спайность не выражена. В кислотах медленно растворяется. По составу дополнительных анионов различают фтор апатит, хлор апатит, гидроксил-apatит. Кальций изоморфно замещается стронцием, иттрием, редкоземельными элементами. Редкоземельные разности апатита люминесцируют фиолетовым цветом в катодных лучах.

Апатит - важнейшее минеральное сырье для получения фосфорных соединений. Подавляющая их часть расходуется на изготовление удобрений.

Важное значение соединения фосфора имеют для химической промышленности.

Виванит - $\text{Fe}_3^{2+}[\text{PO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Сингония моноклинная. Кристаллы

редки; они имеют призматический облик. Иногда встречаются конкреционные стяжения. Обычны землистые массы.

Цвет серовато-белый. Твердость - 1-2. Спайность совершенная по {010}. В кислотах легко растворяется. На воздухе быстро окисляется и приобретает характерную ярко-синюю окраску.

***Контрольные вопросы к самостоятельной
работе студентов***

1. Назовите свойства и признаки минералов группы самородных металлов.
2. Какие полиморфные разновидности минералов группы углерода встречаются в земной коре?
3. Приведите сравнительную характеристику свойств и признаков природных сульфидов свинца, цинка и меди. Какие руды называются полиметаллическими?
4. Охарактеризуйте минералы-сульфиды железа, никеля и кобальта. Какое русское народное название имеют сульфидные руды?
5. Чем отличается пентландит от пирротина; какие формы наиболее характерны для марказита и какие для пирита?
6. Назовите свойства и признаки минералов-сульфидов молибдена, сурьмы и ртути. Какое происхождение имеет название природного сульфида ртути?
7. Какие минералы класса сульфидов имеют самую высокую и самую низкую твердость?
8. Сопоставьте свойства и признаки минералов типа галоидов. Чем обусловлен красный цвет сильвина и карналлита? Какая окраска типична для флюорита?
9. Перечислите разновидности минералов группы кварца.
10. Приведите сравнительную характеристику минералов оксидов и гидроксидов железа и марганца. Какие имеются русские народные названия железистооксидных руд разного минералогического состава?

11. Назовите свойства и признаки минералов-оксидов алюминия. Как называются разновидности корунда? Как называется порода, в составе которой преобладают минералы - гидроксиды алюминия?
12. Укажите отличительные признаки минералов - оксидов олова, титана и хрома.
13. Каковы общие черты и различия минералов - карбонатов кальция, магния, железа и марганца?
14. Какие существуют распространенные карбонаты меди? Назовите их признаки.
15. Охарактеризуйте распространенные минералы класса сульфатов. Чем обусловлены названия минералов - сульфатов бария, стронция и безводного сульфата кальция?
16. Назовите распространенные, имеющие важное экономическое значение минералы классов фосфатов и вольфраматов; укажите их главные признаки.

Глава IV. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ КЛАССА СИЛИКАТОВ

Силикаты - наиболее распространенные неорганические природные соединения. Они составляют около 75% массы земной коры и треть всего количества известных минералов.

Силикаты многообразны. Среди них - главнейшие породообразующие минералы и относительно редкие минеральные воды. Их состав и кристаллохимическая структура, как правило, значительно более сложная, чем других минералов.

Основным элементом кристаллохимической структуры силикатов является кремнекислородный тетраэдр (рис.55) - группировка из четырех ионов кислорода с ионом кремния в центре. Его формула имеет вид $[\text{SiO}_4]^{4-}$.

Кремнекислородные тетраэдрические группировки могут соединяться посредством катионов или сочленяться между собой, образуя сложные комплексные анионы. Такое сочленение осуществляется через вершины тетраэдров. При этом могут возникать кольца, цепочки тетраэдров, непрерывные плоские листы и трехмерные каркасы (рис.56).

Наряду с четырехвалентным катионом кремния в тетраэдрической связи с ионами кислорода может находиться трехвалентный катион алюминия. Сочетания тетраэдрических группировок связаны между собой катионами металлов. При наличии избыточного заряда катионов в структуре некоторых силикатов принимают участие дополнительные анионы $(\text{OH})^{1-}$, F^{1-} , Cl^{1-} . В состав некоторых силикатов также входят молекулы H_2O , менее прочно связанные в структуре, чем анионы и катионы.

Полевые шпаты. Среди силикатов наибольшее распространение имеют полевые шпаты. Эти минералы составляют примерно половину массы земной коры.

Кристаллохимическая структура полевых шпатов характеризуется наличием кислородных тетраэдров с ионами кремния и алюминия, расположенными внутри. Сочетание одного алюмокислородного тетраэдра с тремя кремнекислородными имеет один отрицательный заряд. Сочетание двух кремнекислородных и двух алюмокислородных тетраэдрических группировок обуславливает два отрицательных заряда. Эти отрицательные заряды нейтрализуются катионами щелочных и щелочно-земельных элементов, имеющих крупный ионный радиус. В результате образуется сложный трехмерный каркас, состоящий из сочетаний алюмокислородных и кремнекислородных тетраэдров, соединяемых катионами натрия, калия, кальция и бария.

Бариевые полевые шпаты обладают ограниченным распространением. Основная масса минералов этой группы представлена калинатровыми и натрово-кальциевыми полевыми шпатами.

Расположение тетраэдрических групп обуславливает кристаллизацию полевых шпатов в моноклинной или триклинной сингонии.

Калинатровые полевые шпаты имеют представителей, кристаллизующихся как в триклинной, так и в моноклинной сингонии.

Ортоклаз - $K[AlSi_3O_8]$. Сингония моноклинная. Облик кристаллов призматический, обусловленный развитием граней призмы $\{110\}$ и пинакоидов $\{010\}$, $\{001\}$ (рис.57). Часты простые двойники, плоскостью срастания которых является (010) , а двойниковой осью - перпендикуляр к этой грани (двойники по карлсбадскому закону).

Спайность совершенная по $\{001\}$ и $\{010\}$ под углом 90° . С этим связано и название минерала: ортоклаз - прямораскалывающийся (от греческ. *ортос* - прямой; *клазис* - расщепление). Твердость - 6-6,5. Цвет обычно желтоватый, буроватый, светлый, красный. Бесцветная прозрачная разновидность называется адуляром. Блеск стеклянный.

Для калинатровых полевых шпатов вообще и ортоклазов в частности характерны мелкие, одинаково ориентированные прожилковидные выделения натриевого полевого шпата. Такие образования, возникающие в результате распада твердого раствора этих соединений при понижении температуры, называют пертитамии.

Микроклин имеет тот же состав, что и ортоклаз, однако, в отличие от последнего кристаллизуется в триклинной сингонии и поэтому угол между плоскостями спайности несколько меньше, чем 90° . Иногда образует хорошие, крупные кристаллы, но чаще встречается в виде зернистых выделений. Двойники такие же, как у ортоклаза. Исключительно типичны тонкие перекрещивающиеся полисинтетические двойники, обнаруживаемые в прозрачных шлифах под микроскопом («микроклиновая решетка»).

Цвет буроватый, буровато-красный. Разновидность, содержащая повышенную примесь рубидия и, возможно, цезия, окрашена в красивый зеле-

ный цвет. Эта разновидность называется **а м а з о н и т о м**.

По внешним признакам микроклин неотличим от ортоклаза. Эти минералы различаются только специальными точными методами кристаллооптического исследования на особом приборе (столике Федорова).

Для микроклина характерны закономерные срастания с кварцем, в сколах напоминающие древнееврейские письмена. Эти оригинальные образования, обусловленные одновременной кристаллизацией обоих минералов, называют еврейским камнем или пегматитовым прорастанием. Триклинный калинатровый полевой шпат, содержащий натрия больше, чем калия, называется анортоклазом.

Кальцево-натровые полевые шпаты кристаллизуются в триклинной сингонии. Ионы кальция и натрия имеют близкие величины ионных радиусов, которые заметно меньше радиуса иона калия. Поэтому возможно изоморфное замещение между натровым и кальциевым полевым шпатом в любых соотношениях: **альбит** - $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$; **анортит** - $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$.

Минералы изоморфного ряда от альбита до анортита называются **плаггиоклазами**. Процентное содержание анортитовой «молекулы» Е.С.Федоров предложил выражать номером плаггиоклаза. Плаггиоклазы сгруппированы по следующим названиям:

от 0 до 10	- альбит
от 10 до 30	- олигоклаз
от 30 до 50	- андезин
от 50 до 70	- лабрадор
от 70 до 90	- битовнит
от 90 до 100	- анорит

Облик кристаллов призматический, уплощенный по $\{010\}$. Очень характерны полисинтетические двойники, обнаруживаемые в прозрачных шлифах под микроскопом.

Цвет плаггиоклазов низших номеров обычно белый, высоких номеров -

серый и темно-серый. В результате включения одинаково ориентированных мельчайших кристаллов гематита (железной слюдки) появляется красивая иризация в синеватых тонах. Это особенно типично для Лабрадора.

Спайность совершенная по $\{010\}$ и $\{001\}$, причем угол между плоскостями спайности заметно меньше 90° . Этим плагиоклазы легко отличаются от калиевых полевых шпатов. Твердость - 6-6,5.

Практическое значение полевых шпатов связано с использованием их для изготовления фарфора.

Нефелин - $\text{Na}[\text{AlSiO}_4]$. Кристаллохимическая структура нефелина изучена недостаточно. Предполагают, что она представляет собой сложный каркас алюмокислородных и кремнекислородных тетраэдрических группировок. Сингония гексагональная. Кристаллы, имеющие короткостолбчатый облик, редки (рис.58). Обычны включения и зернистые массы.

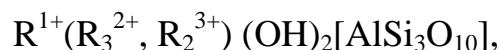
Цвет серый, с желтоватым, буроватым или зеленоватым оттенком. Блеск в изломе жирный, откуда старое название минерала элеолит (от греческ. *элеол* - оливковое масло). Твердость - 5-6. Спайность не выражена. Разлагается соляной кислотой.

Слюды. Слюды — распространенные породообразующие минералы. Их суммарное содержание составляет около 4% от массы земной коры. Слюды обладают слоистой кристаллохимической структурой. Кремнекислородные тетраэдры, соединяясь тремя вершинами, образуют плоские слои. Два таких слоя, обращенные друг к другу свободными ионами алюминия или магния, уравновешены анионами гидроксила. Таким образом, между двумя слоями кремнекислородных тетраэдров образуется слой алюмо(магниево)-гидро-кисильных октаэдров. Четверть позиций кремния в тетраэдрических группировках замещена алюминием. В результате этого возникает дополнительный заряд. Благодаря этому трехслойные листы (пакеты) соединяются между собой при помощи катионов с большим радиусом, обычно ионов ка-

лия (рис.59).

Следовательно, ионы алюминия в структуре слюд могут находиться как в четверной координации, входя в состав тетраэдрических группировок, так и в шестерной координации, располагаясь между двумя слоями тетраэдров.

Общая формула минералов группы слюд будет иметь следующий вид:



где R^{1+} , - одновалентные катионы (калий, натрий); R^{2+} - катионы двухвалентных металлов (магний, двухвалентное железо, частично марганец, никель, кобальт); R^{3+} - катионы трехвалентных металлов (алюминий, трехвалентное железо, частично марганец, хром, ванадий). Ионы кремния могут замещать титан, а ионы гидроксила - фтор, отчасти хлор. На месте магния могут располагаться катионы одновалентного лития благодаря близости их ионных радиусов.

Все минералы группы слюд обладают рядом общих свойств. Они кристаллизуются в моноклинной сингонии. Кристаллы имеют таблитчатый псевдогексагональный облик с преобладающим развитием граней базопинакоида. Спайность весьма совершенная по (001). Твердость - 2-3.

Среди минералов группы слюд можно выделить две основные подгруппы: слюды железистомагнезиальные, в структуре которых в октаэдрическом слое находятся двухвалентные катионы железа и магния, и слюды глиноземистые, в структуре которых в октаэдрическом слое расположены трехвалентные ионы алюминия.

Мусковит - $KAl_2(OH)_2[AlSi_3O_{10}]$ - типичный пример глиноземистых или светлых слюд. Он образует листоватые и пластинчатые скопления. Цвет желтый, зеленоватый, в тонких пластинках бесцветен. Кислотами не растворяется. Натриевая разновидность светлых слюд называется парагонитом, ярко-зеленая хромосодержащая светлая слюда - фукситом. Широко рас-

пространенная мелкочешуйчатая разновидность мусковита, известна под названием серицита.

Лепидолит - $\text{KLi}_2\text{Al}(\text{OH})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$. Цвет белый, с розовато-фиолетовым оттенком. Этим минерал отличается от мусковита. Блеск перламутровый на плоскостях спайности. Лепидолит довольно редок.

Биотит - $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$. Черного, иногда бурого или красноватого цвета. Представляет собой серию изоморфного ряда флогопит (чисто магниальная слюда) — лепидомелан (чисто железистая).

Флогопит имеет желтовато-бурый или красновато-бурый цвет, встречается редко. Лепидомелан — минерал довольно редкий, цвет его черный. Железисто-магниальные слюды в большей или меньшей степени разлагаются кислотами.

Слюды (мусковит и флогопит) находят применение в электропромышленности в качестве изоляционного материала. Особое значение имеет лепидолит, который является одним из основных источников получения лития. Сплавы с литием все больше используются в различных отраслях промышленности. Соли лития применяются в электротехнике, химическом, стекольном, пиротехническом производстве.

Амфиболы - распространенные породообразующие минералы. Кристаллохимическая структура минералов этой группы характеризуется наличием двойных цепочек (или лент), состоящих из кремнекислородных тетраэдров. Формула комплексного кремнекислородного аниона в двойной цепочке имеет вид $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$ к которому присоединяются два иона $(\text{OH})^-$. Двойные цепочки вытянуты вдоль третьей кристаллографической осп и соединяются между собой катионами, связанными с гидроксильными ионами. Общая схематическая формула амфиболов:



где R - одно-, двух- и трехвалентные катионы. При этом катионы с

большим радиусом относятся к катионам с малым радиусом, как 2:5.

Амфиболы кристаллизуются в ромбической и моноклинной сингониях. Ромбические амфиболы - довольно редкие минералы, моноклинные - распространенные. Для них весьма характерна совершенная спайность по призме {110} под углом около 56°.

Наиболее часто встречающимся представителем моноклинных амфиболов является обыкновенная **роговая обманка** - $(Ca, Na, K)_2 (Mg, Fe, Al)_5(OH)_2 [Si_4O_{11}]_2$.

Облик кристаллов призматический, реже короткостолбчатый (рис.60). Образует удлиненные зерна, зернистые массы. Цвет черный, в тонких сколах темно-зеленый. Блеск стеклянный. Твердость - 5,5-6. Характерен занозистый излом. Разновидность бурого цвета, богатая титаном и железом, называется **базальтической роговой обманкой**.

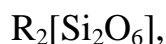
Лучистые амфиболы представлены изоморфным рядом: **тремолит** $Ca_2Mg_5(OH)_2[Si_4O_{11}]_2$ - **актинолит** $Ca_2(Mg, Fe)_5(OH)_2[Si_4O_{11}]_2$. Кристаллы этих минералов имеют тонкопризматический или волокнистый облик. Образуют плотные массы спутанно-волокнистого сложения, игольчато-лучистые агрегаты.

Тремолит белый или светло-серый, актинолит серо-зеленый. Тонковолокнистые плотные массы с шелковистым мерцающим блеском называют нефритом.

Пироксены —распространенные породообразующие минералы. Общее количество пироксенов и амфиболов в земной коре составляет около 16%.

Кристаллохимическая структура пироксенов и амфиболов имеет общие черты, хотя структура пироксенов менее сложная. Она представляет собой вытянутые вдоль третьей кристаллографической оси одинарные цепочки кремнекислородных тетраэдров, которые соединяются катионами. Схемати-

ческая формула пироксенов:



где R - катионы одно-, двух- и трехвалентных металлов.

Пироксены близки амфиболам не только некоторыми чертами своей структуры и состава, но и внешним обликом. Пироксены так же, как амфиболы, обладают совершенной спайностью по призме {110}, но угол между плоскостями спайности равен не 56^0 , как у амфиболов, а 87^0 (на глаз почти прямой). Пироксены обычно образуют короткостолбчатые кристаллы (рис.61) и зерна, в то время как для амфиболов более типичны удлиненно-призматические кристаллы. Твердость, одинаковая с амфиболами, 5,5-6.

Ромбические (вернее, псевдоромбические) пироксены распространены менее моноклинных. Среди ромбических пироксенов известны энстатит - $Mg_2[Si_2O_6]$, гиперстен - $(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$.

Энстатит светло-серый или буровато-зеленый, гиперстен зеленый или буровато-черный. Промежуточная по содержанию магния и железа разновидность ромбических пироксенов называется бронзитом.

Наиболее распространенным моноклинным пироксеном является **авгит** - $Ca(Mg, Fe^{2+}, Al)[Si_2O_6]$. Он образует кристаллы короткостолбчатого облика (рис.61) и сплошные зернистые массы. Цвет черный, блеск стеклянный.

Диопсид - $CaMg[Si_2O_6]$ - имеет светло-зеленый цвет. Обычно образует зернистые массы и включения.

Эгирин - $NaFe^{3+}[Si_2O_6]$ - встречается в виде удлиненно-призматических и игольчатых кристаллов. Типичны шестоватые и радиально-лучистые агрегаты. Цвет обычно зеленовато-черный иногда краснобурый. Черта светло-зеленая.

Группа эпидота. Минералы этой группы довольно широко распространены и даже являются основными компонентами некоторых горных по-

род.

Кристаллохимическая структура минералов цепочечная, но более сложная, чем у амфиболов и тем более пироксенов. Ленты алюмокислородных и кремнекислородных тетраэдров соединяются двух и трехвалентными катионами. Общая формула для всех минералов этой группы имеет следующий вид:



где R^{2+} - катионы кальция, R^{3+} - катионы алюминия и трехвалентного железа.

Кальций может изоморфно замещаться двухвалентным железом, церием, лантаном, натрием и стронцием. Позицию трехвалентных катионов, помимо алюминия и железа, может занимать и хром

Ц о и з и т - $Ca_2Al_3(OH)[Si_3O_{12}]$. Сингония ромбическая. Кристаллы призматического облика. Обычно образует зернистые массы. Цвет серый, зеленый, красновато-бурый. Спайность совершенная по {010} и менее ясная по {100}.

Э п и д о т - $Ca_2(Al,Fe)_3(OH)[Si_3O_{12}]$. Сингония моноклинная. Призматические кристаллы вытянуты вдоль второй кристаллографической оси (рис.). Образует сплошные зернистые массы, радиально-лучистые агрегаты. Цвет фисташково-зеленый. С увеличением содержания железа цвет становится более темным. Твердость - 6,5. Спайность совершенная по {001} и менее хорошая по {100}.

Минерал группы эпидота, содержащий большое количество редкоземельных элементов (церия, лантана и др.), называется ортитом. Он бурого или черного цвета, спайность не выражена, обычно радиоактивен из-за примеси тория. Растворяется в соляной кислоте.

Берилл - $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$. Кристаллохимическая структура характеризуется кольцевыми сочетаниями шести кремнекислородных тетраэдров. Коль-

ца тетраэдров связываются двухвалентными катионами бериллия и трехвалентными катионами алюминия.

Сингония гексагональная. Облик кристаллов призматический с гранями призмы $\{1010\}$ и хорошо развитым пинакондом $\{0001\}$. Берилл образует прекрасные кристаллы, друзы, сплошные массы шестоватых кристаллов.

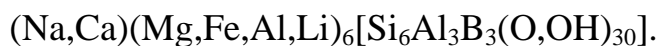
Цвет обычно зеленый или желтоватый, блеск стеклянный. Разновидности ярко-зеленого цвета называются *изумрудами*, прозрачные синеватоголубые кристаллы - *аквамарины*. Редко встречается розовый берилл (*воробейит*). Твердость высокая (7,5-8). Спайность не выражена.

Берилл имеет важное значение, так как является наиболее распространенным бериллиевым минералом. Бериллий - самый легкий металл, в полтора раза легче алюминия. А.Е.Ферсман называл бериллий металлом будущего. Сплавы бериллия с алюминием, медью и другими металлами отличаются высокой прочностью. Бериллиевые сплавы используют в атомном производстве.

Группа турмалина. Эти минералы довольно часто встречаются, хотя и не являются пороодообразующими. По своему составу эти минералы - сложные алюмоборосиликаты. В кристаллической структуре турмалина комплексные анионы представляют собой двойные кольца. Один слой этих колец сложен кислородными тетраэдрами с кремнием в центре, а второй - кислородными тетраэдрами, в центре которых расположены ионы бора и алюминия. Формула такого анионного комплекса, состоящего из двух колец тетраэдров, - $[\text{Si}_6\text{Al}_3\text{B}_3\text{O}_{30}]^{18-}$.

Кольцевые анионные комплексы сложным образом соединяются при помощи катионов кальция, натрия, магния, железа, алюминия и лития. При этом большое количество двухвалентного магния сопровождается появлением ионов гидроксила вместо ионов кислорода. С увеличением содержания катионов алюминия количество гидроксильных групп уменьшается. Общая

формула минералов группы турмалина:



Магнезиальные турмалины называют дравитом, железистые - шерлом, литиевые - эльбаитом.

Сингония турмалина тригональная. Кристаллы имеют удлиненно-призматический, реже - короткопризматический облик (рис.63). Они образованы гранями тригональных призм, несущих вицинальную штриховку параллельно третьей кристаллографической оси. Очень часто образует веерообразные и радиально-лучистые агрегаты (так называемые «турмалиновые солнца»), спутанно-волокнистые массы.

Безжелезистые турмалины имеют светло-зеленый, желтый, красный цвет. Железистые турмалины обычно черные и лишь в тонких сколах просвечивают бурым, синим или зеленым. Часто встречаются кристаллы с зональной полихромной окраской. Блеск стеклянный.

Твердость - 7-7,5. Спайность не выражена. В кислотах не разлагается.

Группа оливина. Минералы этой группы представляют сплошной изоморфный ряд от чисто железистого фаялита до магнезиального форстерита. Промежуточные разновидности называют **оливином** - $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$.

Кристаллохимическая структура минералов группы оливина характеризуется изолированными кремнекислородными тетраэдрами, которые соединяются ионами магния и двухвалентного железа.

Сингония ромбическая. Кристаллы редки (рис.64). Они имеют своеобразный облик благодаря развитию граней призм $\{110\}$ и $\{021\}$.

Цвет желтый, с зеленоватым отливом (оливковый). Блеск стеклянный. Твердость - 6,5-7. Спайность плохо выражена. Разлагается концентрированной серной кислотой.

Оливин не только породообразующий минерал земной коры, но и рас-

пространенный компонент метеоритов.

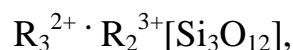
Прозрачные зеленовато-желтые кристаллы оливина - х р и з о л и т ы - являются драгоценными камнями.

Циркон - $ZrSiO_4$. Кристаллохимическая структура представляет собой изолированные кремнекислородные тетраэдры, соединенные катионами циркония. Сингония тетрагональная. Встречается, как правило, в виде призматических кристаллов, образованных тетрагональными призмами и бипирамидами (рис.65).

Цвет желтый, реже оранжевый. Радиоактивные разновидности (малаконы) бурые. Блеск на гранях алмазный. Твердость - 7-8. Спайность не выражена.

Циркон - основное природное соединение циркония. Этот металл необходим для некоторых новых отраслей промышленности.

Группа гранатов. Гранаты не являются распространенными породообразующими минералами, однако в некоторых случаях они служат важной составной частью горных пород. Общая схематическая формула этих минералов:



где R^{2+} - двухвалентные катионы кальция, магния, железа и марганца, R^{3+} - трехвалентные катионы алюминия, железа, хрома и марганца.

Кристаллохимическая структура гранатов образована изолированными кремнекислородными тетраэдрами, между которыми располагаются ионы трехвалентных и двухвалентных катионов. Каждый трехвалентный катион окружен шестью, а двухвалентный - восемью ионами кислорода.

Гранаты кристаллизуются в кубической сингонии. Обычно они находятся в виде хорошо образованных кристаллов (рис.66), а также зернистых масс. Наиболее типичны формы ромбододекаэдра $\{110\}$ и тетрагонтриоктаэдра $\{211\}$. Форма $\{110\}$ настолько характерна для кристаллов гранатов, что

прежде ромбододекаэдр называли гранатоэдром.

Состав и соотношение катионов в гранатах очень разнообразны. Это обусловлено сложными явлениями изоморфизма. Изменение химического состава отражается на физических свойствах минералов, в первую очередь на их окраске. В группе гранатов можно обнаружить все цвета за исключением синего.

Твердость гранатов меняется от 6,5 до 7,5. Спайность невыражена. Несмотря на высокую твердость, гранаты хрупки. Излом неровный. Связь химического состава и некоторых физических свойств минералов группы гранатов показана в таблице 2.

Таблица 2

Физические свойства гранатов

Минерал	Состав	Удельный вес	Цвет	Твердость
Пироп	$Mg_3Al_2[Si_4O_{12}]$	3,51	красно-красный	7,0-7,5
Гроссуляр	$Ca_3Al_2[Si_4O_{12}]$	3,53	желтый, светлозеленый	6,5-7,0
Спессартин	$Mg_3Al_2[Si_4O_{12}]$	4,18	оранжево-желтый, красно-бурый, бурый	7,0-7,5
Альмандин	$Fe_3Al_2[Si_4O_{12}]$	4,25	красный, красно-бурый	7,0-7,5
Уваровит	$Ca_3Cr_2[Si_4O_{12}]$	3,52	изумрудно-зеленый	6,5-7,0
Андрадит	$Ca_3Fe_2[Si_4O_{12}]$	3,75	темнобурый, черный	6,5-7,0

Высокая твердость и хрупкость наиболее распространенных гранатов - спессартинов и альмандинов - позволяет использовать их в промышленности в качестве абразивного материала. Хорошо ограненные прозрачные кристаллы гранатов являются драгоценными камнями.

Группа дистена. Химический состав минералов этой группы отвечает формуле Al_2OSiO_4 . В кристаллохимической структуре этих минералов изолированные кремнекислородные тетраэдры связаны ионами алюминия, которые соединены с добавочными ионами кислорода.

Дистен (кианит). Сингония триклинная. облик кристаллов

столбчатый, удлиненно-призматический. Встречаются сноповидные агрегаты. Цвет синий различных оттенков, серый. Твердость в различных направлениях неодинакова: на грани (100) - 4,5, на грани (010) - 7. Спайность совершенная по {100} и менее совершенная по {010}.

А н д а л у з и т . Сингония ромбическая. Облик кристаллов столбчатый, образует лучистые и зернистые агрегаты. Цвет серый, буроватый, красный. Твердость высокая (7-7,5).

С и л л и м а н и т . Сингония ромбическая. Кристаллы игольчатой формы. Образует плотные массы лучистого и волокнистого строения. Цвет серый, буроватый, бледно-зеленый.

Минералы группы дистена - ценное сырье для производства высокоогнеупорных материалов, стойких к кислотам и щелочам.

Некоторые силикаты слоистой структуры

Хлориты. Минералы этой группы широко распространены и в ряде случаев играют роль породообразующих. Обычно они обладают слюдоподобным обликом и зеленым цветом (от греч. *хлорос* - зеленый).

Состав и строение хлоритов сложны и во многих отношениях недостаточно изучены.

По особенностям кристаллохимической структуры выделяют подгруппы собственно хлоритов и псевдохлоритов. Среди первых преобладают силикаты магния, среди вторых - силикаты железа.

Структура собственно хлоритов характеризуется наличием трехслойных пакетов, построенных, как у биотита, но разделенных слоями состава $Mg(OH)_2$. Эти минералы кристаллизуются в моноклинной сингонии. Кристаллы имеют псевдогексагональный таблитчатый по (001) или листоватый облик. Минералы, как правило, встречаются в виде листочков, мелких чешуек, псевдоморфоз по биотиту.

Твердость низкая (около 2). Цвет зеленый различных оттенков. Блеск

на плоскостях спайности перламутровый. Спайность совершенная по (001). Спайные листочки, в отличие от слюд, не упруги. С трудом разлагаются в серной кислоте.

Наиболее распространенными представителями собственно хлоритов являются п е н н и н и к л и н о х л о р .

Псевдохлориты изучены значительно хуже собственно хлоритов. Типичный их представитель - ш а м о з и т . Он образует оолиты с концентрически-зональным сложением, мелкочешуйчатый аморфный цемент песчаников, землистые массы.

Цвет темно-зеленый, черный. Черта зеленовато-серая. Легко разлагается кислотами.

Богатые железом псевдохлориты, в частности шамозит, разрабатывают как руды железа.

Группа серпентина. Минералы этой группы в определенных условиях имеют значение породообразующих и слагают крупные массивы. Облик серпентиновых пород напоминает змеиную кожу.

Русское название таких горных пород - з м е е в и к . Известны две разновидности серпентина - антигорит и хризотил.

А н т и г о р и т - $Mg_6(OH)_8[Si_4O_{10}]$. Кристаллохимическая структура слоистая, обусловленная повторением двуслойных пакетов, состоящих из слоя кремнекислородных тетраэдров и слоя магниево-гидроксильных октаэдров. Сингония моноклинная. Образует плотные скрытокристаллические массы. Характерны зеркала скольжения. Под микроскопом видно пластинчатое и чешуйчатое строение.

Цвет зеленый, зеленовато-черный, гелевидная разновидность (с е р - п о ф и т , б л а г о р о д н ы й з м е е в и к) имеет бледно-зеленую или желтоватую окраску. Блеск жирный, у серпофита восковой. Твердость — 2—3, спайность заметна только у крупно-чешуйчатых разновидностей. Разлагается

кислотами.

Разновидность, содержащая значительные количества никеля (часто больше, чем магния), называется **р е в д и н с к и т о м**. Он обладает голубовато-зеленым цветом. Ревдинскит входит в состав так называемых силикатных руд никеля.

Хризотил (асбест) - $Mg_6(OH)_8[Si_4O_{10}] \cdot nH_2O$. Кристаллохимическая структура слоистая, однако обломки листов кристаллохимической структуры свернуты в тончайшие трубочки. Внешне это проявляется в волокнистом строении минерала. Параллельно-волокнистые ясно кристаллические агрегаты хризотила называются хризотил-асбестом.

Цвет желтый, серый, грязно-зеленый, с золотистым оттенком. Блеск шелковистый. Твердость - 2-3. В соляной кислоте растворяется. Огнестоек и устойчив по отношению к щелочам.

Обладает способностью расщепляться на тончайшие волокна. Это позволяет использовать асбест для изготовления огнестойких тканей. Из коротковолокнистого асбеста делают различные огнестойкие и электроизоляционные материалы.

Группа талька. Минералы этой группы представлены **т а л ь к о м** - $Mg_3(OH)_2[Si_4O_{10}]$ и **п и р о ф и л л и т о м** - $Al_2(OH)_2[Si_4O_{10}]$. Кристаллохимическая структура этих минералов слоистая, двуслойная и различается составом катионов в октаэдрических слоях. В тальке присутствуют катионы магния, в пиррофиллите алюминия.

Оба минерала относятся к моноклинной сингонии, но кристаллов, как правило, не образуют. Обычны плотные чешуйчатые массы с совершенной спайностью по (001) и низкой твердостью (1).

Тальк имеет бледно-зеленый цвет, чешуйки прозрачны. Блеск на поверхности чешуек стеклянный и перламутровый. На ощупь жирный, поэтому его называют жировиком, мыльным камнем т.д.

Пирофиллит белый, с желтоватым или слабо-зеленым оттенком. Блеск мерцающий, перламутровый. От талька часто неотличим. На огне расщепляется на тонкие листочки. Тальк широко применяется в бумажной и резиновой промышленности, в парфюмерии, в электротехнике для изготовления изоляторов.

Группа глинистых минералов. В этом разделе будет рассмотрено несколько минералов этой группы, обладающих некоторыми общими чертами кристаллохимической структуры и физических свойств. Всем глинистым минералам свойственна слоистая структура. По строению плоских листов (пакетов) глинистые минералы подразделяются на две группы. К группе двуслойных относятся минералы, кристаллохимическая структура которых представляет собой сочетание двуслойных пакетов. Один слой сложен кремнекислородными тетраэдрами, другой - гидроксильными октаэдрами, в центре которых находятся ионы алюминия или магния.

Структура трехслойных глинистых минералов состоит из трехслойных пакетов. В каждом из них внутренний октаэдрический слой ограничен сверху и снизу слоями кремнекислородных тетраэдров. Пакеты соединяются между собой либо непосредственно, либо посредством ионов с большим радиусом. Тетраэдрические кремнекислородные слои имеют состав $n[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$, состав октаэдрических слоев меняется в различных минералах.

Схема строения минералов слоистой структуры приведена на рис. .

Часть кремния в четвертой координации может замещаться алюминием, а алюминий в шестерной координации - железом и магнием.

Подгруппа двуслойных глинистых минералов. Каолинит - $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$. Кристаллохимическая структура каолинита состоит из двуслойных пакетов. Каждый пакет сложен слоем кремнекислородных тетраэдров и слоем алюмогидроксильных октаэдров.

Сингония моноклинная. Кристаллы крайне редки, хотя часто встреча-

ются чешуйки каолинита с четкими гексагональными очертаниями. Образует белые, мягкие, тонкочешуйчатые массы. Часто окрашен примесями в красные, желтые, бурые тона.

Твердость около 2. Спайность весьма совершенная по {001}, что обуславливает чешуйчатость минерала.

Каолинит - важный вид сырья для керамической промышленности. Из него готовят различные фарфоровые и фаянсовые изделия.

Галлуазит - $\text{Al}_4(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Кристаллохимическая структура этого минерала также состоит из двуслойных пакетов как у каолинита, но они разделены слоями молекул воды. При увеличении около 10 000 и более раз (в электронном микроскопе) видно, что частицы галлуазита имеют игольчатое строение. Предполагают, что частицы минералов представляют собой тонкие трубочки, в которые свернуты тончайшие пластинки.

Галлуазит образует землистые скопления, корочки, фарфоровидные массы с плоскораковистым изломом. Цвет белый, светлосерый, желтоватый. Блеск восковой, матовый. Твердость - 1-2. На глаз неотличим от каолинита,

К этой группе относится целый ряд других минералов, в том числе никелевые силикаты, имеющие промышленное значение.

Подгруппа трехслойных глинистых минералов. **Монтмориллонит** - $\text{Al}_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Особенностью структуры этого минерала является разделение трехслойных пакетов слабо связанной водой. Структурная формула схематична, так как часть кремния в четверной координации может замещаться алюминием, а алюминий в шестерной координации - ионами магния, железа, никеля, цинка, меди и др.

Слабая связанность отдельных листов - пакетов в кристаллохимической структуре монтмориллонита обуславливает способность этого минерала сильно набухать в присутствии воды. Объем монтмориллонитовых глин при этом может увеличиваться в несколько раз.

Цвет серый, черный, красноватый, зеленый. Блеск матовый, жирный на ощупь.

Монтмориллонитовые глины применяются при бурении нефтяных скважин для приготовления глинистого раствора. В нефтяной и текстильной промышленности их широко используют для очистки продуктов производства, в резиновой и косметической промышленности применяют в качестве наполнителей.

Гидрослюды широко распространены в земной коре. Кристаллохимическая структура этих минералов занимает как бы переходное положение между структурой светлых (глиноземистых) слюд и структурой монтмориллонита. Гидрослюды обладают трехслойными пакетами, которые соединяются лишь частично ионами калия, позиции которого в большей или меньшей мере замещены катионной группой гидроксония $[\text{H}_3\text{O}]^{1+}$. Схематическая формула гидрослюд следующая:



Ионы алюминия в октаэдрической группировке обычно частично замещены магнием и железом (преимущественно трехвалентным) .

Гидрослюды составляют большую, недостаточно изученную группу глинистых минералов. Среди них особо следует отметить **г л а у к о н и т** , образующийся на дне моря. Этот минерал имеет темно-зеленый цвет и представлен обычно округлыми образованиями (песчинками).

Контрольные вопросы к самостоятельной работе студентов

1. Комбинация каких ионов является главным структурным элементом кристаллохимической структуры силикатов?
2. Напишите формулу состава калиевых полевых шпатов и объясните как эта формула отражает их кристаллохимическую структуру. Перечислите основные свойства и признаки полевых шпатов и укажите, в чем разли-

- чие их двух наиболее распространенных представителей.
3. Как называются минералы - крайние представители изоморфного ряда плагиоклазов. Напишите формулы их состава.
 4. Перечислите диагностические признаки нефелина и укажите его второе название.
 5. Назовите распространенные минералы - представители группы слюд. Начертите схему кристаллохимической структуры мусковита. Напишите их формулы. Почему в формуле этого минерала алюминий фигурирует в двух местах.
 6. Приведите приме изоморфного ряда в группе слюд. Какой признак в наибольшей мере отражает изоморфное изменение состава биотитов.
 7. Назовите характерные диагностические признаки минералов группы амфиболов. Как называется самый распространенный амфибол?
 8. Каковы диагностические признаки минералов группы амфиболов? В чем проявляются различия амфиболов и пироксенов?
 9. Назовите силикат бериллия и его разновидности.
 10. Как формула состава оливина отражает кристаллохимическую структуру этого минерала? Какой диагностический признак отражает изменения состава в изоморфном ряду оливинов?
 11. Какие представители группы гранатов Вам известны? Каковы их диагностические признаки и какие причины влияют на изменение их цвета?
 12. Дайте минералогическую характеристику минералов группы серпентина. Как сказывается на морфологии минералов этой группы особенности их кристаллохимической структуры. Какие русские народные названия известны для некоторых минералов этой группы?
 13. Назовите распространенные глинистые минералы, их свойства и признаки. Начертите схемы двух главных типов их кристаллической структуры.