

## ЛЕКЦИЯ 1

### МИНЕРАЛ, МИНЕРАЛЬНЫЙ ВИД, РАЗНОВИДНОСТЬ

Классификационной единицей в минералогии служит минеральный вид. Одно из современных определений минерала было дано акад. В.С. Соболевым, который к минеральным видам относит природные соединения, имеющие однотипную структуру и состав, изменяющийся в определенных пределах. Минерал обладает правильным, закономерным расположением атомов, что устанавливает пределы для изменения его химического состава и придает ему характерные физические свойства.

Минералы существуют в виде **индивидуов**, различающихся своей морфологией, особенностями внутреннего строения кристаллов, свойствами. Вследствие явлений изоморфизма индивидуы одного и того же минерала могут отличаться в каких-то пределах по химическому составу, а значит, и по некоторым особенностям кристаллической решетки индивидуов. Это подобно тому, как в мире живой природы индивидуы растений и животных отличаются друг от друга – каждый из них в чем-то индивидуален, отсюда и происходит это название. Обобщая наблюдения, в биологии вводят понятие вида. Также и в минералогии имеется понятие «минеральный вид», которое возникло как результат обобщения наблюдений по множеству индивидуов.

Минеральным видом называют природное химическое соединение с определенным составом (в пределах небольших вариаций) и кристаллической структурой. Использование этого понятия рассмотрим на примере минералов, называемых гранатами. Общая формула гранатов имеет вид  $R_3^{2+}R_2^{3+}(SiO_4)_3$ , они кристаллизуются в кубической сингонии. Имеют различный цвет – от белого, зеленого, желтого, коричневого, красного до черного с разными их оттенками. Физические свойства (плотность, блеск, твердость) их также различны. Это объясняется различием химического состава минералов вследствие изоморфизма. Возьмем, например, пироп  $Mg_3Al_2(Si_3O_{12})$  и альмандин  $Fe_3Al_2(Si_3O_{12})$ , представляющие собой чистые вещества, которые в природе практически не встречаются. Поэтому из железо-магнезиальных гранатов к пиропам относят гранаты состава  $(Mg, Fe)_3Al_2(Si_3O_{12})$ , в которых пироба будет более 50 %. Как бы не изменялся химический состав гранатов, их структура не меняется, если не считать различия некоторых межплоскостных расстояний и изменения позиций конкретных атомов. Главное – пространственная группа симметрии их кристаллической решетки остается неизменной.

А вот, например, **полиморфные модификации** – это разные минеральные виды. Так диоксиды кремния  $SiO_2$  тригональной и тетрагональной структур являются разными минералами (минеральными видами) – кварц (первый) и стишовит (второй).

В пределах минерального вида выделяют разновидности по химическому составу и структурным особенностям, и как следствие разновидности по физическим свойствам, кристалломорфологии и т.д.

**Химическими разновидностями** – это минералы данного минерального вида, отличающиеся друг от друга некоторыми отклонениями состава от предельной химической формулы минерального вида. Предельной называется химическая формула идеально чистого вещества (**минерал**). Принадлежность минерала определяется по главным химическим элементам в его составе – так принято в решениях Международной минералогической ассоциации.

**Структурными разновидностями** называют минералы данного минерального вида, отличающиеся некоторыми особенностями структуры. Так, при изоморфных замещениях атомов происходит некоторое искажение структуры – она в обычном случае становится не такой идеальной, но в пределах понятия «минеральный вид». Бывают более сложные случаи, как, например, в непрерывном ряду кальцит  $CaCO_3$  – родохро-

зит  $MnCO_3$  в некоторых случаях смеси половинных составов характеризуются особым порядком расселения примесных атомов в решетке минерала и появляется самостоятельный минеральный вид – кутнагорит с составом  $CaMn(CO_3)_2$ .

### Число, состав и симметрия минералов

Общее число минеральных видов составляет около 3500–4000. Расхождения в подсчетах связаны с тем, что, во-первых, некоторые минералы изучены недостаточно полно и поэтому неоднозначно воспринимаются некоторыми исследователями. Во-вторых, принятые границы понятий «минеральный вид», «структурная и химическая (особенно структурная) разновидность» условны, а потому в сложных случаях эти границы могут быть проведены по-разному.

Наиболее многочисленны минеральные виды, в которые входят кислород и водород, – это основные химические элементы в мире минералов. Затем по числу минеральных видов химические элементы выстраиваются в такой ряд (в порядке убывания): Si, Fe, Ca, S, Al, Na, Mg, Cu, Mn, P, As, Pb. Однако неоднородность распределения химических элементов в протопланетном веществе Солнечной системы предопределила существенную разницу в наборе минералов, выявленных на внутренних и внешних планетах. Главными на внутренних планетах (Меркурий, Венера, Земля, Марс) являются силикаты, алюмосиликаты и оксиды. Минеральные фазы внешних планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон) экзотичны для земных условий – это кристаллические  $H_2O$ ,  $CH_4$ , S,  $SO_3$ .

На примере Земли и ее коры явственно проступает главная количественная закономерность: ряд убывания распространенности химических элементов в земной коре во многом совпадает с рядом убывания числа минералов для этих же химических элементов (табл. 1).

Таблица 1

#### Распространенность химических элементов в земной коре и число минералов для них

Химический элемент	Содержание в земной коре, ат. %	Число минералов	Химический элемент	Содержание в земной коре, ат. %	Число минералов
O	53,39	2909	Fe	1,31	883
H	17,25	1921	K	1,05	288
Si	16,11	906	C	0,51	272
Al	4,80	714	Ti	0,22	196
Na	1,82	560	Cl	0,10	220
Mg	1,72	555	F	0,07	221
Ca	1,41	867	S	0,05	761

Здесь только три исключения – для минералов кальция, железа и серы. Но если учесть числа минералов меди (437), фосфора (398), марганца (416), мышьяка (387), свинца (371), бора (179), урана (199), этих расхождений будет значительно больше. Они объясняются разными факторами, такими как степень активности элемента (число минеральных видов больше у химически активных элементов), неравномерным распределением химических элементов по горным породам, зонам и участкам минералообразования в земной коре.

## Классификация минералов

Современные основы систематики минералов как химических соединений заложены шведским химиком и минералогом Й. Я. Берцелиусом в 1814 г. Впервые наиболее полное выражение эта химическая основа нашла в классификации Дж. Дэна, в третьем издании его многотомного издания «Система минералогии» (1850–1854). Здесь было выделено пять классов: а) самородные вещества; б) сернистые и мышьяковистые соединения; в) галоидные соединения; г) кислородные соединения; д) органические вещества. Эти подразделения почти без изменений сохраняются во всех переизданиях справочника Дж. Дэна и практически во всех современных классификациях минералов; в одних классификациях они выступают в качестве классов, в других – в качестве типов.

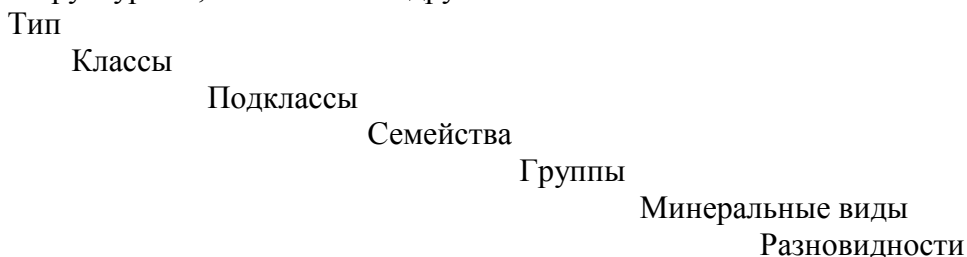
Во всех классификациях начальным является выделение минеральных видов, затем они объединяются в группы, но в различных классификациях это делается по-разному.

Дело в том, что авторы современных классификаций стремятся учесть сразу два фактора – химический состав и структуру (это заменяют одним словом – кристаллохимия). Так, на двух основах построены почти все современные классификации: Х. Штрунца (1941, 1982, 1997), А. Г. Бетехтина (1950), А. С. Поваренных (1966), Е. К. Лазаренко (1971), Е. И. Семенова (1981), А. А. Годовикова (1975, 1979, 1983).

Наиболее логична классификация, построенная только на одном принципе – химическом, которому отдавал предпочтение В. И. Вернадский. Такая классификация будет полнее отражать родственные связи или, наоборот, различия минералов как химических веществ. Такая классификация создана Г. Б. Бокием. В структурной кристаллографии и кристаллохимии более ценна классификация, построенная на структурных признаках. Вообще же в любой науке должны одновременно присутствовать разные типы классификаций, которые с разных сторон могут охарактеризовать объекты минералогии и установить связи между ними.

Мы будем пользоваться упрощенной системой сведений, которая призвана дать студентам самую общую картину химического состава и структуры минералов.

Все множество минералов по химическому принципу разбито на типы, они подразделены по этому же принципу на классы. Классы мы делим уже с учетом структуры минерала на подклассы. Подклассы же в свою очередь разбиты на группы. Это сделано то на химической, то на структурной основе. В редких случаях прибегают к еще одной категории промежуточной между подклассом и группой – семейству. В группы объединяются минеральные виды. Ниже по отношению к минеральному виду располагаются разновидности – структурные, химические и другие.



## Названия минералов

По существу минералы – это химические соединения и названия в минералогии и химии должны были бы соответствовать. Однако это не так. Используемые в настоящее время исторически сложившиеся названия минералов случайны по отношению к современной трактовке понятия минерала и минеральных видов, а очень многие излишни, так как относятся к многочисленным разновидностям минералов.

Есть названия, данные по собственным именам и фамилиям (биотит – в честь французского физика Жана Батиста Био, открывшего в кристаллах оптическую двуосность); по географическим названиям (ильменит – от Ильменских гор на Урале; мусковит, вернее московит, – от древнего «Московия»); по физическим свойствам («ортоклаз» от

греч. – прямоколющийся «орто» – прямо, «класис» – растрескиваться, колотья; олигоклаз – иначеколющийся; «альбит» от лат. – белый); по химическому составу (куприт, от лат. – медь). А. С. Поваренных в 1966 г. предложил принципы переименования минералов по их химическому составу, но разработанные им названия не нашли широкого признания.

Минералы это химические соединения, поэтому минералогия – это своего рода химия земной коры. Однако это чисто теоретический аспект минералогии. Практический аспект заключается в том, что геолог должен знать и уметь диагностировать объекты своей науки минералы, а в дальнейшем и горные породы, что немисливо без знания минералов. При изучении материала вы должны ясно понимать, что знание минералов у студентов закладывается лишь во время их практических, лабораторных и самостоятельных (в том числе и вне учебного расписания) занятий с эталонными и рабочими коллекциями и в музее. В этом отношении минералогия оказывается коварным предметом для недавних еще школьников: ее невозможно заучить дома по учебникам, не затратив серьезных усилий на практическую работу с минералами, а их-то дома и нет. Трудно и то, что у большинства студентов далеко не сразу складываются навыки диагностики минералов, поначалу это огорчает и отпугивает их от дальнейших самостоятельных занятий. Не сразу дается умение правильно определить твердость минерала, распознать оттенки его цвета и особенности блеска, выявить спайность, сделать верные предположения о морфологии кристаллов и их симметрии. Важно проявить упорство, а затем в какой-то момент навыки работы с минералами станут привычными.

Полезно составлять для себя таблицы минералов:

- 1) название минерала, химическая формула, главные примеси;
- 2) тип структуры, сингония, форма кристаллов и агрегатов (рисунки);
- 3) спайность (степень совершенства, число направлений, углы);
- 4) излом;
- 5) твердость;
- 6) блеск;
- 7) цвет;
- 8) черта;
- 9) прочие свойства (магнитность, растворимость и др.);
- 10) условия нахождения;
- 11) минералы-спутники;
- 12) сходные минералы и отличительные признаки;
- 13) практическое значение;

Но заносить в ваши таблицы все сведения уже ошибка, иначе для чего же справочники? Важно указать для себя лишь те сведения о минерале, которые помогут самому диагностировать минерал. Если же пренебречь практической работой по изучению минералов, заученные теоретические знания быстро превращаются в бессмысленный набор сведений ни о чем.

## **ЛЕКЦИЯ 2**

### **ПРОСТЫЕ ВЕЩЕСТВА**

#### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ**

К этому типу минералов относятся, во-первых, элементарные вещества (как говорят, самородные элементы), например, графит С, алмаз С, медь Cu, висмут Bi, их твердые растворы друг в друге, например, минералы состава (Au–Ag), (Au–Cu), (Pt–Fe), (Os–Ir).

Во-вторых, к тому же типу относятся особые химические соединения – интерметаллиды  $Pt_3Sn$ ,  $Pt_3Fe$ ,  $Pt_2FeNi$ ,  $Cu_7Hg_6$  и др. (в них каждый металл занимает свои строго определенные позиции в кристаллической решетке минерала). Интересно в этом плане сравнить интерметаллид  $Pt_3Fe$  и минерал  $(Pt,Fe)$  (твердый раствор). В первом расселение атомов платины и железа строго закономерно, минерал имеет свою особую структуру; у второго структура такая же, как у платины, лишь часть ее атомов неупорядоченно замещена железом.

Все простые вещества – очень редкие минералы, суммарно они слагают не более 0,02 % массы земной коры. Однако именно в виде таких минералов образуют промышленные концентрации некоторые особо ценные металлы – золото, платина, осмий, иридий, серебро. Значительная доля промышленных запасов серы как химического сырья сосредоточена в виде химически чистого элемента – самородной серы. Некоторые самородные элементы сами по себе являются ценным техническим материалом, например, алмаз и графит из-за своих особых свойств – твердости (алмаз), электропроводности и тугоплавкости (графит).

Ранее считалось, что самородное состояние возможно только для некоторых химических элементов в силу их инертности. Современные исследования привели к открытию самородного цинка, алюминия, кадмия, кремния и многих других ранее уникальных минералов, но, как оказалось, они, во-первых, образуются действительно в уникальных условиях, и, во-вторых, в ничтожно-, исчезающе-малых количествах и мельчайших зернах.

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Кристаллические структуры минералов простых веществ относительно просты, причем эта простота особо характерна для самородных металлов.

Большинство самородных металлов и их твердые растворы имеют структуру, отвечающую плотнейшим упаковкам – кубической или гексагональной. Например, золото, медь, серебро, алюминий (кубические), цинк, рутений, осмий (гексагональные). Чем сильнее характер связей в веществе отличается от металлической, тем более структура минерала отличается от идеальной плотнейшей упаковки и тем она сложнее, например, алмаз, сера, графит.

Структура серы является молекулярной. В каждой молекуле объединено в виде кольца по восемь атомов, соединенных ковалентными связями (полностью взаимно компенсирующимися, а суммарный заряд такого кольца равен нулю). Кольца накладываются друг на друга в виде колонок, по-разному ориентированных в пространстве. Кольца и колонки связаны между собой остаточными вандерваальсовыми связями. Все это влияет на внешнюю симметрию и огранку кристаллов, а также их физические свойства.

Отдельно характеризуем структуры природных полиморфов углерода – алмаза и графита. В первом атомы углерода располагаются равномерно во всех трех измерениях. Кристалла по всему его объему, каждый атом окружен четырьмя соседними, между ними осуществляются ковалентные связи.

Структура второго полиморфа – слоистая, внутри слоя атомы связаны смешанными ионно-ковалентными, между слоями – вандерваальсовыми<sup>1</sup> или металлическими связями.

## МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Облик кристаллов – внешняя симметрия и огранка – тесно связаны с их структурой и условиями роста. Например, самородные металлы, обладающие плотнейшей кубической упаковкой имеют внешнюю симметрию с огранкой кристаллов в виде куба, октаэдра, ромбододекаэдра и их комбинаций (золото, медь, серебро). Гексагональная (тригональная)

---

<sup>1</sup> Вандерваальсовы по Батти и Прингу; металлические – по А.Г. Бетехтину, Булах и др.

упаковка проявляется в виде призм и дипирамид, усеченных сверху и снизу гранями пинакоида (таковы кристаллы иридия).

У самородных элементов – неметаллов разнообразие кристаллов и сложность их огранки гораздо более выражены, и они относятся к разным сингониям. Сера кристаллизуется в ромбической сингонии в форме многогранников дипирамидального облика с гранями призмы и пинакоида. Кристаллы графита – это, как правило, тонкие пластинки, алмаз образует октаэдры, ромбододекаэдры, реже кубы.

Так же ярко проявляется структура и тип связей в физических свойствах минералов – простых веществ.

**Самородное золото, серебро, медь, железо** и другие металлы имеют типичный для металлов блеск, высокие значения электропроводности и теплопроводности, ковки в разной степени и не имеют спайности. Имеют очень высокую плотность: от 8,4 (Cu) до 19 (Au и Pt).

**Сера** с ее молекулярной структурой хрупка, имеет малую плотность (2,05 – 2,08 г/см<sup>3</sup>) и невысокую твердость (около 3), легко воспламеняется и при этом плавится.

**Графит** в результате резкой анизотропии строения кристаллической решетки имеет весьма совершенную спайность по уплощению кристаллов (по пинакоиду) и высоко электропроводен из-за существенно металлических связей между слоями углерода в его структуре.

**Алмаз** обладает сравнительно высокой плотностью (3,5–3,6 г/см<sup>3</sup>) и твердостью 10 из-за необычной компактности своей структуры и ковалентных связей между атомами углерода.

## ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ

Первое условие образования минералов – простых веществ – это, прежде всего инертность, малая активность химических элементов, таких как платина, осмий, иридий, золото.

Второе важное и часто независимое условие – малая химическая активность кислорода в среде минералообразования. Иногда это условие выполняется в процессе образования некоторых горных пород мантийного происхождения. Полагают, что так образуются в ультраосновных горных породах самородные металлы группы платины и алмазы. Бывают экзотические условия, при которых понижается активность кислорода, например, при прорыве базальтовых расплавов через угленосные толщи осадочных горных пород. В этом случае возможно появление самородного железа. К числу таких же экзотических условий относится и образование самородной меди, как промежуточного продукта окисления сульфидов меди халькопирита  $CuFeS_2$  и др.

Особый тип процессов образования самородных элементов – биохимические реакции. Так, за счет жизнедеятельности некоторых бактерий могут формироваться крупные месторождения самородной серы в осадочных горных породах.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☉ **Медь Cu.** Химические примеси редки. Обычно это Ag, Au, Fe. Сингония кубическая. Встречается в виде желваков, одиночных неправильных зерен, проволочных, пластинчатых выделений в трещинах, в виде дендритов. Из всех металлов только медь способна образовывать самородки такого колоссального размера. Геологи встречали залежи сплошной самородной меди, масса которых составляла сотни тонн. Цвет медно-красный, часто медь покрыта черными, зелеными, синими налетами оксидов и гидрокарбонатов меди.

Блеск в свежем сколе металлический. Твердость 2,5–3, плотность 8,4–8,9 г/см<sup>3</sup>. Встречается вместе с купритом, теноритом, малахитом, хризоколлой в зоне окисления сульфидных руд и вместе с цеолитами в пустотах лав.

Является рудой на медь. Месторождения: Джеккаган (Казахстан), Турьинские рудники, Меднорудянк, Гумешевские копи (Урал). Самое большое в мире месторождение самородной меди возникло гидротермальным путем в пустотах базальтовых лав. Месторождение находится в Северной Америке, в штате Мичиган, на южном берегу озера Верхнего. И по сей день эти залежи самородной меди – один из крупнейших по запасам металла меднорудных районов мира.

Узнается по частой ассоциации с купритом, теноритом, малахитом, хризоколлой, по цвету и блеску, по большой плотности и ковкости, по крючковатому излому.

☉ **Золото Au.** Химические примеси Ag, Pd, Rh, Cu, Fe, Bi. Сингония кубическая. Встречается в виде мельчайших пластинок (золотин), неправильных выделений и вкраплений в кварце и сульфидах (пирите, арсенопирите, блеклых рудах); правильные кристаллы очень редки, относительно чаще наблюдаются скелетные кристаллы, дендриты золота. В осадочных породах (россыпях) золото имеет облик самородков разных форм и размеров (массой от долей грамма до нескольких десятков килограммов). Цвет золотистый, блеск металлический, твердость 2–3, плотность около 16–18 г/см<sup>3</sup>, у чистого золота 19,3 г/см<sup>3</sup>. Более 99 % золота, имеющегося в земной коре, присутствует в самородном виде. А оставшийся процент складывается из очень редких в природе соединений золота с другими металлами.

Главнейшие промышленные месторождения – это, во-первых, среднетемпературные (реже низкотемпературные) гидротермальные жилы, во-вторых, речные россыпи и конгломераты (современные и древние).

Узнается по цвету, блеску, мягкости, большой плотности, ковкости и частой ассоциации с кварцем.

Добыча золота известна с глубокой древности. В более близкие к нам Крупнейшие месторождения. Новый Южный Уэльс и штат Виктория в Австралии – россыпи; Березовское, Урал; Майкаин и Степняк, Казахстан; Алдан и другие места в Сибири; Витватерсранд, Ю. Африка; Аляска, Калифорния, Невада, Северная Америка.

☉ **Серебро Ag.** Примеси Au (10 % Au – кюстелит, а при большем содержании – электрум). Редкий минерал. Наблюдается в виде тонких пластин, листочков в трещинах руд и пород, а также в виде проволочных кристаллов и их агрегатов в пустотах руд. Очень редко встречаются кристаллы серебра. Это кубы или октаэдры или сочетание этих форм. Гигантские самородки – это колоссальная редкость. Как уникальные явления описаны самородки массой 0,5; 1,5; 5; 40 т. Цвет серебристо-белый, блеск металлический. Излом крючковатый. Ковок (1 кг металла можно вытянуть в проволоку длиной 2 км). Плотность 10–11,1 г/см<sup>3</sup>.

Из-за малой плотности и способности к истиранию почти не скапливается в россыпях. Образуется в среднетемпературных гидротермальных (полиметаллических) и других месторождениях и в зоне окисления рудных месторождений.

В отличие от золота, большая часть серебра сосредоточена не в самородном виде, а рассеяна в виде примеси в сульфидах свинца, сурьмы, кобальта. Особенно много его извлекают из главного сульфида свинца – галенита.

☉ **Железо Fe.** (от латинского «феррум» – твердый, славянское слово «зализо» имеет один корень с лезвием оружия и орудий труда). В природе встречается в двух полиморфных модификациях кубической сингонии – феррит ( $\alpha$ -Fe) и тэнит ( $\gamma$ -Fe). В первой содержится никеля от 0,2 до 5–8 %, во второй – до 70 %. Обе модификации – крайне редкие минералы. Феррит встречается в виде вкраплений и крупных масс металла в некоторых земных и лунных базальтах. В последние годы обнаружили мельчайшие вкрапления феррита в различных горных породах (от ультраосновных до кислых), в алмазе и оливине кимберлитов. Обе модификации железа являются главными составляющими частями же-

лезных и железокатенных метеоритов. Их агрегаты в метеоритах имеют на полированной и протравленной азотной кислотой поверхности штриховой узор, известный под названием фигур Видманштеттена (ученый Алоис Видманштетт в 1808 г. исследовал упавший вблизи местечка Штаннерн железный метеорит). В таких агрегатах феррит максимально обогащен никелем (в литературе по планетологии и астрономии его называют камаситом), имеет форму пластинок, а пространство между ферритовыми пластинками заполнено тэнитом. Эти агрегаты являются, видимо, результатом распада на две фазы первичного однородного твердого раствора никель – железо. Плотность железа 7–7,8 г/см<sup>3</sup>. твердость 4–5. Черта стально-серая. Самородки железа в отличие от самородков других металлов быстро окисляются с поверхности и всегда одеты в буро-черную рубашку. В отличие от других самородных металлов действует на магнитную стрелку, отклоняя ее.

## ЛЕКЦИЯ 3

### Сернистые соединения и их аналоги

☺ **Платина Pt.** Природная платина является твердым раствором очень сложного состава (Pt, Ir, Ru, Os, Pd, Fe, Ni). Крайне редка. Встречается в ультраосновных горных породах мантийного происхождения в виде мельчайших включений. В условиях земной коры преобразуется в ряд минералов, таких как тетраферриплатина, изоферриплатина, самородный Os и Ir, спёррилит PtAs<sub>2</sub>, куперит PtS и др. Эти минералы платины являются главными формами ее концентрации. При выветривании ультраосновных горных пород и последующем размыве кор выветривания платина, тетраферриплатина и изоферриплатина накапливаются в россыпях, откуда они и добываются для получения чистой платины.

Все минералы платины встречаются совместно в общих зернах и самородках. Их многофазность распознается только в микроскопах с большой разрешающей способностью. Поэтому долгое время платину принимали за один минерал переменного и сложного состава и называли самородной платиной или поликсеном (от греч. «поли» – много, «ксенос» – чужой). А чистая платина является очень редкой. Цвет таких зерен и самородков меняется от серебристо-белого до зелено-черного, твердость колеблется в пределах 4–4,5, плотность от 15 до 21,5 г/см<sup>3</sup>. Самородная платина магнитна и электропроводна.

Образуется в ультраосновных породах, особенно в дунитах (вместе с хромитом), а также в россыпях, образовавшихся в результате эрозии этих пород.

Месторождения. Основными источниками платины вот уже более 50 лет являются 3 горнорудных гиганта: 1) Бушвельдские рудники, Трансвааль (Ю. Африка) на долю которых приходится 50 % мировой добычи; 2) важным промышленным источником являются никель- и медьсодержащие сульфидные руды, такие как в Садбери, пров. Онтарио (Канада); 3) россыпи в р-не Нижнего Тагила на Урале.

☺ **Сера S.** Обычно химически чистая. Сингония ромбическая. Встречается в виде канифолеподобных и аморфных на вид масс, гнезд, прожилков, друз в осадочных горных породах, а также в виде одиночных кристаллов в составе вулканических возгонов. Кристаллы образованы комбинацией граней дипирамид, призм, пинакоида. Полупрозрачная. Цвет желтый, зеленовато-желтый, грязно-желтый. Блеск жирный в агрегатах и на изломе кристаллов, а на гранях – алмазный. Хрупкая, мягкая (твердость 1–2), имеет малую плотность (2,05–2,08 г/см<sup>3</sup>). Плавится и загорается в пламени спички.

Промышленные месторождения образуются как продукт кристаллизации вулканических возгонов и в осадочных горных породах. В них сера формируется за счет разложения сероводорода бактериями или за счет окисления его кислородом воздуха, затем она многократно перекристаллизовывается и переотлагается.

Используется для производства серной кислоты и как ядохимикат.



Узнается по цвету, блеску, форме кристаллов, легкой воспламеняемости и по обычной приуроченности к глинам и другим осадочным породам.

Месторождения. Шорсу, Узбекистан – осадочное; Каракумы, Туркмения – осадочное; Алексеевское и Водинское в Куйбышевской области – осадочное; Соймоновская долина, Урал – в связи с разрушением пирита; Сицилия – осадочное, штаты Луизиана и Техас С. Америка – осадочные.

☉ **Графит С** (от греческого «графо» – пишу). Обычно химически чист. Сингония гексагональная. Чаще всего встречается в плотных, жирных на ощупь и на вид массах темно-серо-черного цвета, реже (в мраморах, сланцах и др.) образует вкрапленность одиночных пластинчатых гексагональных кристаллов с сильным металлическим блеском.

Твердость 1. Блеск металловидный. Плотность около  $2 \text{ г/см}^3$ . Электропроводен.

Промышленные месторождения графита приурочены к нефелиновым сиенитам и метаморфическим горным породам.

Графит используется в металлургии, в качестве технических смазок, для изготовления электродов и движущихся контактов в электроаппаратуре.

Узнается по цвету, мягкости и форме одиночных кристаллов.

Месторождения. Алиберовское, Бурятия – в нефелиновых сиенитах; Курейское (Туруханский р-н Красноярского края) – на контакте каменного угля с лавами; Украинские – в гнейсах; Мадагаскар – в гнейсах; Шри-Ланка – в кварцевых и пегматитовых жилах.

☉ **Алмаз С**. Полиморфная модификация углерода, устойчивая при высоких давлениях. Состоит из углерода на 96–99,8 %. В качестве примесей (от  $n \cdot 10^{-8} \%$  до 0,3 %) могут встречаться более 25 элементов. Сингония кубическая. Кристаллы в виде октаэдров, ромбододекаэдров, гораздо реже – кубов. Очень часто на гранях имеются многочисленные ступеньки роста и растворения; если они неразличимы глазом, грани кажутся искривленными, сферическими. Распространены и пластически деформированные кристаллы. Кроме монокристаллов, алмазы часто образуют закономерные и незаконмерные сростки. Первые разделяются на двойники и параллельные сростки (преобладают двойники треугольной формы).

Незаконмерные сростки весьма типичны для алмаза, они образуют поликристаллические агрегаты. Среди поликристаллических агрегатов выделяют борт, баллас и карбонадо.

Борт – это мелкозернистые неправильной формы агрегаты беспорядочно ориентированных кристаллов, различимых невооруженным глазом или под микроскопом. Темная окраска из-за графита.

Карбонадо – скрытокристаллические образования алмаза (5–10 мкм) с присутствием графита. Форма неправильная или округлая. Обычно их масса 0,1–1 кар, но бывает и до нескольких сот грамм ( $> 3000$  кар).

Балласы (дробеобразный борт, алмазы Кунца) – под таким названием известны поликристаллические образования округлой формы с радиально-лучистым строением. Диаметр таких зерен от нескольких мм до 20 мм, реже больше.

Существует еще одна разновидность алмазов ударного происхождения. Обнаружена в метеоритных кратерах. Поликристаллические агрегаты размером 1–2 мм и меньше. Имеют слоистое или волокнистое строение.

Кристаллы массой более 400 кар (80 г) очень редки и все известны: (3106 Куллинан (Ю. Африка), 972 Эксельсиор (Ю. Африка), 967 Звезда Сьерра-Леоне (З. Африка), 793 Великий Могол (индия), 770 Войя (З. Африка), 727 Президент Варгас (Бразилия), 726 Джонкер (Ю. Африка), 651 Юбилейный (Ю. Африка) и т. д.

Твердость алмаза в среднем 10 около, но она чуть различается на разных гранях и при царапании в разных направлениях (93 157–98 648 МПа). Этим и пользуются при распиливании и шлифовке кристаллов алмаза алмазом. Имеется спайность по октаэдру. Плотность  $3,50\text{--}3,53 \text{ г/см}^3$ .

Окраска алмазов разная, чаще всего встречаются почти бесцветные прозрачные кристаллы. Хотя совершенно бесцветные алмазы довольно редки. Обычно у них наблюдается какой-либо оттенок (нацвет). Окраска алмазов связана с различными дефектно-примесными центрами, а иногда с включениями ряда минералов. Встречаются интенсивно окрашенные алмазы желтого (азот), оранжевого, зеленого, голубого, синего (из-за бора), розового (дефекты решетки), коричневого, молочно-белого (мелкодисперсные включения граната), серого, черного (графит) цвета. Среди окрашенных алмазов большой известностью пользуются сапфино-синий алмаз «Хоуп» (масса 44,5 кар), голубого цвета «Королева Голландии» (136,5 кар), яблочно-зеленый «Зеленый Дрезден» (41 кар), желтые алмазы «Тиффани» (128,5 кар), «Красный крест» (205 кар), Мун (183 кар), «Иранский желтый» (183 кар), янтарно-желтый «Алмаз Альберта» (102 кар), розовый алмаз «Непал розовый» (72 кар), черные алмазы из Баии (350 кар).

Алмаз имеет высокий показатель преломления (2,42), сильную дисперсию 0,043 (0,062), что обуславливает игру света («пламень») в бриллиантах при специальной их огранке.

Алмаз не смачивается водой, но прилипает к жировым смесям.

Под воздействием катодных, рентгеновских и ультрафиолетовых лучей некоторые алмазы люминесцируют, что вызвано дефектами их структуры. Цвет люминесценции различен – от зеленого и желтого до голубого и синего.

Алмазы диэлектрики. Отличаются очень высокой теплопроводностью (выше, чем у меди).

Происхождение. Алмазы добывают из первичных и вторичных месторождений. Среди первичных главными являются вертикальные трубообразные тела (диатремы), самое большое из них прослежено на глубину 1 км и уходит вниз. Это вулканические жерла, заполненные брекчией. Брекчия состоит из обломков окружающих и осевших сверху пород, вынесенных с глубин 45–90 и более км. Цементом является вулканогенный материал ультраосновного состава, который называется кимберлитами или лампроитами. Алмазы входят в состав глубинных пород (алмазных перидотитов и эклогитов), но чаще встречаются в виде отдельных кристаллов в массе пород. Часто кристаллы оплавлены, деформированы, резорбированы, частично растворены. Кимберлитовые трубки располагаются на древних платформах (кратонах), лампроитовые – в их обрамлении. Время образования трубок разное – от протерозойских (1,2 млрд. лет тр. Премьер) до кайнозойских (менее 30 млн лет – трубки Канады). Образование трубок связано с прорывом вверх по узким каналам под большим давлением щелочно-ультраосновных расплавов. Некоторые трубки не достигают палеоповерхности, а залегают где-то на глубине.

Наиболее богатые алмазами трубки известны в Австралии и Южной Африке. Алмазные трубки имеются в Сибири (Якутия), Архангельске, Канаде, США, Китае и других местах.

Применение. Помимо использования в ювелирных целях алмазы широко используются в технике в качестве сверхтвердого материала для изготовления буровых коронок, резцов, сверл, абразивных материалов. 75–80 % добываемых алмазов являются техническими. Потребности техники в алмазах столь велики, что налажена индустрия производства синтетических алмазов, т. к. природных алмазов для техники не хватает.

## СЕРНИСТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ИХ АНАЛОГИ

К этому типу относится около 500 минеральных видов, главным образом сернистых соединений металлов и полуметаллов, таких как дисульфид двухвалентного железа – пирит  $\text{FeS}_2$ , сульфид железа и меди – халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ , сульфид цинка – сфалерит  $\text{ZnS}$  и более сложные соединения. С позиции общей химии их можно разбить на три класса (см. табл.): 1) простые сульфиды, как бы соли сероводородной кислоты (сфалерит  $(\text{Zn,Fe})\text{S}$ , киноварь  $\text{HgS}$ , сульфид 4х валентного молибдена – молибденит  $\text{MoS}_2$  и др.) и

многокомпонентные соли сероводородной кислоты (халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ , борнит  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , станнин  $\text{Cu}_2\text{FeSns}_4$ ; 2) соли сульфокислот, т. е. бескислородных кислот, в которых роль кислорода играет сера (красная серебряная руда (прусит)  $\text{Ag}_3(\text{SbS}_3)$  – это как бы серебряная соль сурьмяной сульфокислоты  $\text{H}_3\text{SbS}_3$ ); 3) полисернистые соединения (персульфиды), они, можно сказать, являются солями полисернистой кислоты  $\text{H}_2\text{S}_2$  со своеобразным комплексным двухзарядным анионом  $(\text{S}_2)^{2-}$  (дисульфид двухвалентного железа – пирит  $\text{Fe}(\text{S}_2)$  и др.).

Ближайшими аналогами сульфидов являются арсениды и их смешанные соединения (арсенидосульфиды), например, арсенопирит  $\text{Fe}(\text{AsS}_2)$  и лёллингит  $\text{Fe}(\text{AsS})$ , как бы служащие аналогами вещества  $\text{FeS}_2$ . Также аналогами сульфидов по химическому составу являются селениды и теллуриды: алтаит –  $\text{PbTe}$  (сравните с галенитом –  $\text{PbS}$ ),  $\text{PbSe}$  – клаусталит. В данном случае аналогии мы говорим только о подобии химических формул, а не о прямой аналогии минералов.

Сернистые соединения и их аналоги имеют большое промышленное значение. Они являются главной рудой на медь, цинк, свинец, ртуть, висмут, кобальт, никель и другие цветные металлы. Из них извлекают мышьяк, сурьму, а пирит  $\text{Fe}(\text{S}_2)$  служит сырьем для получения серной кислоты. Обратите внимание – черные металлы (Железо, хром, марганец) из руд, где они представлены сульфидами не извлекаются (избыток серы мешает получению чистого металла).

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Главные кристаллохимические особенности сульфидов определяются сочетанием в их кристаллических решетках иона серы и металлов (железа, меди, свинца, цинка и т.д.). Ионные радиусы серы (0,174 нм) гораздо больше ионных радиусов двухвалентного железа (0,082), свинца<sup>2+</sup> (0,132), цинка<sup>2+</sup> (0,083) – в целом колеблются от 1,03 до 0,06 нм. Как результат структуры сульфидов далеко не всегда соответствуют плотнейшей упаковке атомов. Крупные ионы серы легко поляризуются, что приводит к образованию комплексных анионов типа  $(\text{S}_2)^{2-}$ ,  $(\text{AsS}_3)^{3-}$  и т. п. В целом сульфиды характеризуются большим разнообразием структур и сложными химическими связями в них – ионно-металлическими, ионно-ковалентно-металлическими, донорно-акцепторными, но всегда с преобладанием именно металлической компоненты.

Упрощенно и несколько формально разделяют все типы структур на следующие условные типы: координационные, островные, цепочечные (ленточные), слоистые с комплексными анионами. Есть и другие типы структур, но они более редки.

Координационная структура (например, галенит –  $\text{PbS}$ ) подобна структуре галита  $\text{NaCl}$ , где позиции натрия заняты свинцом, а хлора – серой. Координационные числа свинца и серы одинаковы – 6. свинец и сера взаимно окружают (координируют) друг друга без образования каких-либо группировок. По этому же принципу построены структуры сфалерита, пирротина, никелина, халькопирита.

Островная структура характерна для персульфидов и их аналогов – кобальтина, марказита, арсенопирита, пирита. Структура пирита является, как и у галенита, аналогом структуры галита, но в пирите атомы серы не одиночные, а двоянные. Они объединены ковалентными связями в комплекс  $(\text{S}_2)^{2-}$ , это как бы островная обособленная группировка в структуре минерала. Сходные островные группировки выделяют в структурах арсенопирита и кобальтина – это комплекс  $(\text{AsS})^3$ , в скуттерудите  $(\text{As}_4)^4$ . В этих комплексах, атомы объединяясь, стремятся создать вокруг себя восьмизлектронную оболочку. Но электронов не хватает и число не хватающих электронов и есть заряд комплекса, он компенсируется за счет связей с атомами металлов в минерале.

Ленточные структуры типичны для антимонита  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  и висмутита  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ . В антимоните каждая лента бесконечна и имеет состав  $(\text{Sb}_2\text{S}_3)^0$ , в минерале они ориентированы параллельно друг другу и соединены остаточными (вандерваальсовыми) связями.

Примером слоистых структур является структура молибденита. Она как бы состоит из трехслойных пакетов, в каждом из них средний слой молибденовый, верхний и нижний – из атомов серы.

Структура с комплексными анионами характерна для сульфосолей. Комплексными анионами являются кислотные радикалы, занимающие в структуре несколько обособленные позиции. Такими комплексными анионами могут быть  $(SbS_3)$ ,  $(AsS_3)$ ,  $(AsS_4)$ ,  $(SbS_4)$ .

## ЛЕКЦИЯ 4

### Сернистые соединения и их аналоги

#### МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Некоторые сульфиды служат яркими примерами зависимости внешнего облика кристалла от структуры минерала. Сульфиды с координационными структурами кристаллизуются в кубической сингонии (сфалерит, галенит и др.), образуют кристаллы в виде простейших тетраэдров, кубов, октаэдров, иногда усложняемых другими гранями. Они могут кристаллизоваться и в других сингониях, но все равно их облик часто будет изометричным (псевдокубическая внешняя симметрия). Например, кристаллы халькопирита – тетрагонального минерала координационной структуры. Их тетрагональный тетраэдр внешне не отличим от кубического тетраэдра. Также изометрична форма пирита (кубическая сингония), хотя его структура не координационная, но очень близкая к ней и отличается лишь заменой одиночных атомов серы на вдвоенные.

Ярко проявлена связь внешней формы и структуры у цепочечных (ленточных) и слоистых сульфидов. Например, антимонит и молибденит. Первые имеют длиннопризматический облик, кристаллы удлинены вдоль цепочек  $(Sb_2S_3)^0$  в пространственной решетке минерала. Структура молибденита слоистая с шестичленными кольцевыми группировками атомов внутри слоев. Соответственно этому кристаллы молибденита имеют вид шестиугольных пластинок (пинакоидов) с тончайшими, порой невидимыми гранями других простых форм.

Физические свойства сульфидов и их аналогов очень специфичны. Внешне они подобны металлам: непрозрачны, имеют металлический или металлоидный блеск, цвета, как и у металлов, в большинстве случаев серо-черные и желтые (реже – красные и синие) разной интенсивности и оттенков, электропроводны. Все эти особенности обусловлены преобладанием металлических связей в сульфидах. Так же характерна сравнительно низкая твердость (от 1 до 5 – ниже, чем у стекла), которая также обусловлена металлическим типом связи. Твердость персульфидов (пирита, кобальтина, марказита, арсенопирита, скуттерудита) равна или более 5, что обусловлено преобладанием в этих минералах преимущественно ковалентных, сильных связей внутри островных группировок  $(S_2)^{2-}$ ,  $(AsS_3)^{3-}$  и т.п. В то же время свойства реалгара, в структуре которого можно выделить островные группировки  $(As_4S_4)^0$ , иные: он мягкий (тв. 1,5–2), имеет спайность, легко плавится ( $310^\circ C$ ). Это объясняется тем, что связи между комплексами слабые, остаточные.

Сульфиды обладают способностью одновременно к электронной и ионной проводимости электричества. В результате два смоченных контактирующих зерна двух разных сульфидов, образуют гальванический элемент. В результате электрохимических реакций (как на аноде и катоде) часть ионов переходит в водный раствор и выносится за пределы рудного тела. Таким образом, появляются ореолы рассеяния, по которым можно искать эти руды.

За счет интенсивной окраски, сульфиды дают на бисквите хорошую черту. Цвет черты является одним из диагностических признаков сульфидов.

## ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ СУЛЬФИДОВ

В природе сульфиды кристаллизуются чаще всего из водных растворов при температурах около 600 °С и ниже. Так образуются гидротермальные месторождения. Сульфиды в них образуют жилы и чаще всего находятся совместно друг с другом. Так же из гидротермальных растворов кристаллизуются сульфиды в скарнах, грейзенах и метаморфических породах. Из водных растворов образуются сульфиды в осадочных породах.

Рассмотрим три типа сульфидных месторождений – стратиформные, ликвационные и конкреции в придонных осадках.

Стратиформные (пластовые) месторождения образуются в различных по составу осадочных породах и представляют главный источник для добычи меди, свинца, цинка и некоторых других металлов. Для них характерен простой набор минералов: пирит, халькопирит, борнит, халькозин, галенит, сфалерит, которые встречаются в различных пропорциях. Они располагаются в виде вкрапленности, мелких зерен, прожилков во вмещающих их осадочных породах, реже образуют цемент песчаников или создают массивные руды. Существует две альтернативы образования сульфидов в осадочных породах. Руды образуются либо непосредственно из вещества, отложенного в процессе осадконакопления путем его преобразования, либо при переносе его гидротермальными растворами, которые просачивались через осадочные породы как через фильтр. Такие месторождения характеризуются большими размерами и даже при малом содержании рудных компонентов, являются крупными концентраторами руд.

Несколько особняком среди стратиформных стоят колчеданные месторождения. Они представляют собой пласты осадочных или вулканогенно-осадочных пород, насыщенных сульфидами (до 70–90 % объема пород). Сульфиды представлены в основном притом и халькопиритом с примесью других сульфидов. Они образуются в областях вулканической деятельности в придонных морских отложениях при пропитывании их металлоносными эксгаляциями.

Ликвационные месторождения образуются в платформенных интрузивных массивах, сложенных габброидами и ультраосновными породами (перидотитами). Образуются в результате разделения первично однородного расплава на две несмешивающиеся части – сульфидную и силикатную. Непонятно, правда, откуда берется сера, либо из вмещающих пород (гипса, ангидрита), либо магма была обогащена ей изначально. Сульфиды образуют каплеобразные выделения, слагают пласты, при деформациях отжимаются в трещины и образуют жилки, гнезда, линзы. Сульфиды в таких месторождениях обогащены тонкорассеянной платиной и окислами железа и титана (магнетитом, титаномагнетитом).

В придонных осадках в водных бассейнах в ходе диагенеза образуется пирит, марказит, галенит, сфалерит. Сначала они образуют рассеянную вкрапленность за счет коагуляции и раскристаллизации коллоидов. Затем в ходе уплотнения осадков образуются конкреции пиритового, марказитового или смешанного состава.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☺ **Халькозин**  $Cu_2S$  (медный блеск, содержит около 80 % Cu). Ромбический. Встречается в сплошных массах, в виде желваков, вкрапленности в медистых песчаниках. Цвет серо-черный, излом шероховатый, блеск слабый металлический, ковок. Для него характерны налеты азурита, малахита и сульфатов меди.

Это низкотемпературный гидротермальный минерал, также обычен для зоны окисленных руд, где образуется в подзоне вторичного сульфидного обогащения. Типичен для медистых песчаников. Совместно с другими минералами служит рудой на медь.

Узнается по цвету, характеру выделений, цветным налетам. От сходных по виду блеклых руд отличается тем, что игла оставляет на нем блестящую царапину.

☉ **Галенит PbS** (от слова «галена» – свинцовая руда). Синоним – свинцовый блеск. Примеси Ag, Sb, Ti, Se, Te. Содержит 87 % свинца. Сингония кубическая. Встречаются кристаллы – это кубы и комбинации куба с октаэдром. Обычно образует зерна, вкрапленные в кварц, карбонаты, сфалерит и агрегаты других минералов. Сплошные массы образуют зернистую, плотную разновидность (свинчак). Масса таких скоплений достигает десятков и сотен тонн.

Цвет свинцово-серый (с некоторой голубизной), блеск металлический, от сильного до слабого. Весьма совершенная спайность по кубу – легко колется ступеньками по трем взаимно перпендикулярным плоскостям. Блеск металлический. Иногда бывает синеватая побежалость.

Мягче кальцита – тв. 2,5. Рвет бумагу. Очень тяжелый (плотность 7,6 г/см<sup>3</sup>). Раскалывается при ударе на серебристые блестящие кубики и прямоугольники.

Образуется в скарнах, гидротермальных и стратиформных месторождениях. Является главной рудой на свинец. Нередко из него попутно извлекают серебро, висмут, таллий и др.

Легко узнается по цвету, спайности, большой плотности, низкой твердости и ассоциации минералов – сфалерита, и других сульфидов.

☉ **Сфалерит (Zn, Fe)S**. От греческого слова сфалерос – обманчивый, т.к. по внешним признакам не похож на обычные сульфиды металлов. Содержание цинка может достигать 67 %. Железа не более 20 % от суммы железа и цинка. Может содержать в виде примеси Mn, Cd, Hg, Sn. Сингония кубическая. Часто встречаются в виде кристаллов в пустотах. Кристаллы в виде тетраэдров. Обычно образует вкрапления одиночных зерен, сверкающих на плоскостях спайности алмазным или полуметаллическим блеском. Спайность совершенная по ромбоэдру, т. е. по шести разноориентированным плоскостям, поэтому зерна многократно взблескивают при поворотах образца. Агрегаты (сплошные массы) характеризуются явнозернистой структурой, легко распознаванию благодаря резко проявленной спайности.

Свойства сильно зависят от состава: почти безжелезистые разновидности прозрачны, бесцветны или зеленоватые, медово-желтые, сверкают алмазным блеском (клеюфан); маложелезистые, но с марганцем разновидности имеют красно-коричневый цвет и алмазный блеск; сильно железистые цинковые обманки коричнево-черные и черные, с полуметаллическим блеском, спайность в них проявлена хуже (марматит). Черта во всех случаях коричневая, но разной интенсивности (от светлой до бурой).

Образуется совместно с галенитом и пиритом в гидротермальных месторождениях, скарнах и стратиформных рудах. Является рудой на цинк и кадмий.

Легко узнается по спайности, блеску, цвету и ассоциации с галенитом, халькопиритом, кварцем, кальцитом.

☉ **Пирротин** (от греч. «пиррос» – огнецветный). Синоним магнитный колчедан. Состав переменный – приблизительно FeS, но почти всегда имеется недостаток железа (избыток серы). Это объясняется дефектами структуры минерала за счет гетеровалентного изоморфизма  $3\text{Fe}^{2+} \leftarrow 2\text{Fe}^{3+} + \square$ . С учетом изоморфизма формула пирротина записывается как  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ . Для конкретных минералов нередко указывают частные формулы, например,  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ,  $\text{Fe}_8\text{S}_9$ . Сингония гексагональная.

Встречается в сплошных мелкозернистых массах и в отдельных бесформенных вкраплениях бронзового цвета с тусклым металлоидным блеском, шероховатым изломом. Кристаллы редки, имеют таблитчатый псевдогексагональный облик. Пирротин легко выветривается, быстро покрывается бурой пленкой, скрывающей собственный цвет и блеск минерала. Слабо магнитен, но может быть и немагнитен.

Образуется в разных условиях, широко распространен в природе. Практического значения не имеет и во многих металлургических процессах является вредной примесью.

Узнается по бронзовому цвету в свежих сколах, слабой магнитности, бесформенности выделений. От пирита отличается отсутствием форм, а от халькопирита цветом (последний имеет зеленовато-желтый цвет).

☉ **Никелин NiAs**. Синоним – красный никелевый колчедан. Сплошные тонкозернистые и почковидные скопления светлого медно-красного цвета в составе гидротермальных урановых (с сульфидами) месторождений. В зоне окисления нередко замещается аннабергитом в виде порошковых масс светло-зеленого, зеленого цвета.

☉ **Киноварь HgS**. Предполагают, что это индийское название, где так называется красная смола и «кровь дракона». Образует ало-красные, карминово-красные зерна, вкрапленные в песчаник или мрамор или входящие в состав кварцевых жил с антимонитом и флюоритом. В крупных зернах заметны спайность и алмазный блеск на ее плоскостях. Их форма – сплюснутые ромбоэдри или толстые трехгранные таблички, сросшиеся в плоские друзы.

В агрегатах блеск жирный. Матовый. Черта яркая ало-красная, как от мокрого карандаша. Очень тяжелая (плотность 7,7 г/см<sup>3</sup>). Образуется в низкотемпературных гидротермальных месторождениях. Является рудой на ртуть.

Узнается по цвету, черте, ассоциации с флюоритом, антимонитом, кварцем. Характерная форма кристаллов киновари – ромбоэдри и их двойники прорастания.

Способность ртути растворять золото используется для извлечения тончайшей пылевидной вкрапленности золота из коренных руд.

Образуется исключительно гидротермальным путем при низких температурах.

Месторождения. Наиболее крупное находится на Украине – Никитовское. Также крупные месторождения: Альмаден (Испания), Идрия (Югославия)

☉ **Стибнит (антимонит)**. Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. (от греческого «атнос аммонос» – цветок). Sb – сурьма. Сингония ромбическая. Встречается всегда в виде шестоватых или игольчатых кристаллов, часто чуть изогнутых, со штриховкой вдоль удлинения, или их агрегатов. Цвет темно-серый, иногда с яркой индигово-синей побежалостью на гранях. Блеск металлический. Хорошая спайность вдоль удлинения, на ней часто заметна поперечная штриховка.

Образуется в гидротермальных месторождениях в ассоциации с киноварью, кварцем и флюоритом. Является рудой на сурьму.

Легко узнается по форме кристаллов и их штриховке, по ассоциации минералов.

Расплавленная сурьма отличается от большинства металлов уникальным свойством – она напоминает воду, вернее, лед – при затвердевании её объем тоже увеличивается. Это очень ценное качество используется в типографском деле, т. к. все сделанные из нее отливки очень точно повторяют любые волосные линии. Сурьма входит в сплав со свинцом и оловом – это гарт – и незаменим в типографском деле. Кроме этого сурьма в соединении со свинцом образует баббиты – сплавы, названные в честь И. Баббита – создателя первого подшипникового сплава. Здесь сурьма в сочетании со свинцом дает «твердую мягкость». Мельчайшие кусочки твердой сурьмы погружены в пластичный и мягкий свинец и медь, что дает устойчивость к трению. Сурьма используется также в полупроводниковой технике (в сочетании с германием).

☉ **Висмутин Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>**. Во всем подобен антимониту, но несколько светлее по цвету.

Образуется в высокотемпературных гидротермальных месторождениях вместе с пиритом, халькопиритом, вольфрамитом, мелкочешуйчатой слюдой – мусковитом. Является рудой на висмут.

☉ **Реальгар AsS**. Образует яркие оранжево-красные призматические кристаллы с алмазным блеском на гранях и зернистые массы, вкрапления, прожилки в кальците. Тв. 1,5–2. Хрупкий. Излом неровный, шероховатый. Плотность 3,4–3,6 г/см<sup>3</sup>.

Встречается в низкотемпературных гидротермальных месторождениях вместе с аурипигментом в составе кварцевых и кальцитовых жил или слагает оперяющие их мономинеральные жилы.

неральные прожилки в глинистых сланцах. Как и аурипигмент, является рудой на мышьяк.

Узнается по цвету (в отличие от киновари имеет оранжево-красный цвет) и оранжевой черте, по ассоциации с аурипигментом. Под действием света бледнеет и превращается в порошок светло-оранжевого цвета. Под действием электрического света растрескивается и превращается в порошок.

Малораспространенный минерал, но в случае больших скоплений, например, Лухумское месторождение (Западная Грузия) используется для производства  $As_2O_3$ .  $AsS$  используют в красильном деле, пиротехнике, стекольном производстве и др.

☉ **Аурипигмент  $As_2S_3$** . (от латинского золотой цвет, золотая краска). Выделяется в виде удлиненно-пластинчатых кристаллов и их сростков, а также в виде землистых масс. Имеет яркий золотисто-желтый цвет, совершенную спайность и перламутровый блеск на плоскостях спайности. Плотность 3,4–3,5 г/см<sup>3</sup>.

Встречается в низкотемпературных гидротермальных месторождениях вместе с реальгаром, кальцитом, кварцем. Является рудой на мышьяк. Легко узнается по яркому лимонно-желтому цвету, ассоциации, низкой твердости (1–2).

Применение. Сырье для получения трехоксида мышьяка, а также в красильном производстве. Месторождение Лухумское, Джульфимское (Нахичевань), Алахар (Македония).

☉ **Молибденит  $MoS_2$** . Сингония гексагональная. (от греч. молибдос – свинец). Характерны пластинчатые кристаллы серого (с чуть голубым оттенком) цвета с весьма совершенной спайностью по пинакоиду и металлическим или жирным блеском. Также обычны розетковидные, чешуйчатые, сплошные (массивные) агрегаты таких кристаллов. Исключительно мягкий (тв. 1), жирный на ощупь.

Образуется при высоких температурах в разнообразных типах месторождений. Промышленные концентрации молибден образует в грейзенах, высокотемпературных гидротермальных месторождениях, и скарнах. Почти всегда ассоциирует с кварцем. Часто с ним не встречаются другие сульфиды.

Легко узнается по мягкости, форме кристаллов, спайности. От сходного с ним графита отличается более светлой окраской и более бледной чертой, она при растирании другим бисквитом заметно зеленеет.

Применение. Является единственным промышленным источником молибдена. Около 90 % этого металла расходуется на изготовление различных высококачественных сортов стали (жаростойких). Используется в электротехнике, красочном производстве, химическом и др.

Месторождения. Крупнейшее месторождение Клаймакс в Колорадо (США)

☉ **Пентландит  $(Fe,Ni)S$**  (приблизительно). Этот минерал диагностируется трудно. В первую очередь он может находиться в сплошных мелкозернистых пирротиновых и халькопирит-пирротиновых массах в ультраосновных и основных горных породах. Он имеет цвет то как у пирротина, то как у халькопирита и выделяется на их фоне в виде оспин, зерен, вкраплений с синим металлическим блеском и совершенной спайностью по октаэдру (4 направления). Плотность 4,5–5 г/см<sup>3</sup>. Твердость 3–4.

Образуется в ликвационных медно-никелевых сульфидных рудах. Руда на никель.

Узнается по минеральной ассоциации, по спайности. Все ультраосновные и основные породы с вкрапленностью халькопирита и пирротина следует проверять на присутствие пентландита. С пиритом ассоциирует редко.

Месторождения. Крупнейшее месторождение Садбери (Канада)

☉ **Халькопирит  $CuFeS_2$** . Синоним медный колчедан. Кристаллы очень редки (тетрагональные октаэдры и др.). Обычны зернистые агрегаты и бесформенные выделения, жилки, гнезда. Цвет зеленовато-желтый (латунно-желтый) неповторимого, типичного именно для халькопирита оттенка. Излом шероховатый. Блеск металлический. Черта зелено-черная. Плотность 4,1–4,3 4,5–5 г/см<sup>3</sup>. Твердость 3–4.



Широко распространенный в природе минерал.

Промышленное значение как руды на медь имеют медно-никелевые сульфидные месторождения ликвационного типа (в ультраосновных и основных) породах (Садбери, Канада), среднетемпературные гидротермальные месторождения полиметаллической и колчеданной формации (Турьинские рудники, Урал); медистые песчаники (Карпушинское, Левихинское, Урал; Джекказганское, Казахстан)

Легко окисляется, покрываясь радужными синими, зелеными, красными пленками ковеллина и борнита. Часто замещается с поверхности, по трещинам или целиком гидроксидами железа, малахитом, азурином.

Легко узнается по своему латунно-желтому цвету и ярким вторичным минералам, развивающимся по нему.

☉ **Борнит  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$** . Синоним пестрая медная руда. Встречается в виде неправильных гнезд и жилок в кварце, тонкой вкрапленности и цемента медистых песчаников, тончайших вторичных пленок на халькопирите.

Цвет красный особого оттенка, но только в свежих сколах, розовато-бурый. Быстро выветривается, покрываясь бурыми, зелеными, синими пленками (побежалости) вторичных минералов – ковеллина и др.

Образуется как низкотемпературный минерал, а также в окисленных медно-сульфидных рудах в зоне вторичного сульфидного обогащения. Является рудой на медь.

Узнается по цвету в свежем изломе и пестрой окраске выветрелых поверхностей минерала.

Происхождение: 1) гидротермальные месторождения (Успенское, Джекказганское, Центральный Казахстан, ряд месторождений Урала), так и экзогенные (в зоне окисления медно-сульфидных руд). Встречается с халькопиритом.

☉ **Ковеллин  $\text{CuS}$** . Синоним медное индиго. Назван в честь итальянского минералога Ковелли. Это тончайшие индигово-синие пленки вторичного изменения (побежалость) на халькопирите, борните, блеклой руде и других сульфидах меди или иссиня-черные землистые массы. продукт окисления медно-сульфидных руд. Твердость 1,5–2. Плотность 4,6 г/см<sup>3</sup>.

☉ **Красные серебряные руды**. Это минералы непрерывного изоморфного ряда от  $\text{As}_3(\text{SbS}_3)$  (прустит, по фамилии химика Пруста, впервые разделившего эти две руды) до  $\text{Ag}_3(\text{AsS}_3)$  (пираргирит, от греч. огонь и серебро). Встречается в виде тригонально-скаленоэдрических кристаллов и зерен в составе гидротермальных рудных жил. Цвет киноварно-красный, серый, блеск алмазный на гранях, цвет черты красный. Твердость 2–2,5. Плотность 5,5–5,6 г/см<sup>3</sup>. На углах и в тонких сколах пираргирит просвечивает.

Происхождение гидротермальное совместно с галенитом, самородным серебром и др. Встречается редко.

☉ **Блеклые руды**. Минералы переменного состава – упрощенно от **теннантита**  $\text{Cu}_{12}(\text{AsS}_3)_4\text{S}$  до **тетраэдрита**  $\text{Cu}_{12}(\text{SbS}_3)_4\text{S}$ . Медь может изоморфно замещаться серебром, цинком, ртутью, железом и др.; мышьяк и сурьма – висмутом; сера – селеном, теллуrom. Таким образом это большая группа минералов, объединяемая много минеральных видов. Преобладают в природе медно-мышьяковые и медно-сурьмяные блеклые руды. Все они внешне очень сходны друг с другом. Кристаллы очень редки. Обычны неправильной формы массивные на вид выделения, гнезда, прожилки в кварце.

Цвет черно-серый. Излом неровный шероховатый. Блеск тускло-металлический, блеклый, отсюда и их общее название. Твердость 3–4. Плотность 4,4–5,4 г/см<sup>3</sup>.

Типичный минерал среднетемпературных (иногда низкотемпературных) гидротермальных, в частности золотоносных, месторождений.

Месторождения. Крупные самостоятельные месторождения блеклых руд не встречаются. Совместно с другими медьсодержащими сульфидами являются источником меди (Березовское месторождение, Богатые рудники, Урал).

## ЛЕКЦИЯ 5

☉ **Буланжерит  $Pb_5(Sb_2S_4)_2S_3$** . Моноклинный. Содержание свинца около 58 %. Входит в состав полиметаллических гидротермальных руд в виде неправильных сплошных выделений и игольчатых, спутанно-волоконистых масс темно-серо-коричневого цвета. Твердость 2,5–3, хрупок. Плотность 6,2 г/см<sup>3</sup>. Распознается с трудом, уверенно диагностируется с помощью микроскопа. Характерен коричневатый оттенок черты.

В случае значительных скоплений представляет интерес как свинцовая руда.

Месторождения. Нагольный кряж (Украина), Нерчинский район в Восточном Забайкалье и др.

☉ **Пирит  $FeS_2$** . Серный или железный колчедан. Изоморфные примеси Co, Ni, As, Cu, Sb. По греч «пирос» – огонь. Сингония кубическая. Очень характерны кристаллы в виде куба, пентагон-додекаэдра и их комбинаций. При этом на гранях куба обычна грубая штриховка (на каждой грани она перпендикулярна к направлению штриховки на любой из соседних граней). Эта штриховка называется комбинационной, т. к. она образована комбинацией тончайших граней куба и пентагон-додекаэдра и возникает в процессе роста кристаллов при смене его облика от кубовидного к пентагон-додекаэдрическому. Часто встречаются сплошные агрегаты. Цвет пирита соломенно-желтый, золотисто-желтый. Блеск сильный, металлический. Твердость выше твердости стекла (6,5). Черта буровато- или зеленовато-черная. Плотность 4,9–5,2 г/см<sup>3</sup>. Иногда покрыт пленочками побежалости бронзового, красноватого цвета.

Пирит самый распространенный сульфид в природе, образуется почти во всех горных породах и типах минеральных месторождений. Как сырье для химической промышленности добывается из колчеданных месторождений. Используется для производства серной кислоты. В металлургии является вредной примесью. В некоторых случаях (в среднетемпературных гидротермальных месторождениях) является золотоносным минералом, т. к. может содержать тончайшую вкрапленность золотин. Может содержать кобальт, никель, селен, медь.

Легко узнается по форме кристаллов, золотистому цвету, высокой твердости. По этим признакам отличается от халькопирита и пирротина, с которыми его иногда путают. При окислении замещается лимонитом. Часты полные псевдоморфозы лимонита по пириту.

Известны многочисленные месторождения на Урале (Калатинское, Карабашская группа и др.)

☉ **Марказит  $FeS_2$** . Смысл этого арабского названия утерян. Сингония ромбическая. Синонимы лучистый колчедан, копьевидный колчедан, гребенчатый колчедан говорят сами за себя – именно лучистые, копьевидные и гребенчатые (ромбодипирамидальные) формы самые характерные для марказита. Еще больше характерны для него натечные формы: шары, корочки, почки. Как и пирит он замещает раковины и стволы растений, образует псевдоморфозы по минералам, в том числе и по пириту. Нередко сростается с пиритом. Твердость 6. Блеск металлический.

Марказит несколько отличается от пирита цветом (светло-желтый, чуть темнее, чем у пирита), но все же в сплошных массах, сферолитах и псевдоморфозах его от пирита без специальных анализов не отличить. В отличие от пирита, марказит крупных скоплений почти не образует. Узнается по копьевидной форме.

По разнообразию форм марказитовых конкреций славятся Курьи-Каменские и Троицко-Байновские месторождения глинистых отложений на восточном склоне Среднего Урала. Известны кристаллы марказита на гидротермальных месторождениях Клаусталь и Фрейберг (Германия).

☉ **Кобальтин  $Co(AsS)$** . Кобальтовый блеск. Кристаллы такие же, как и у пирита. Также образует зернистую вкрапленность в рудах. Цвет белый или стально-серый с розо-

ватым оттенком. Богатые железом разновидности имеют темно-серый или серовато-черный цвет. Твердость 5–6. Спайность по кубу. Плотность 6,0–6,5 г/см<sup>3</sup>. Черта серовато-черная.

Встречается в скарнах. В зоне окисления замещается порошковатыми массами розового эритрина. Является рудой на кобальт (содержит Co 26–34 %).

Месторождения: в Канаде (округ Кобальт, Онтарио), Скуттеруд (Норвегия) и Тунаберг (Швеция).

☉ **Арсенопирит Fe(AsS)**. Синоним мышьяковый колчедан. Изоморфные примеси Ni, Co, Sb. Сингония ромбическая. Очень характерны кристаллы, удлиненные или клиновидные, с грубой штриховкой. Цвет стально-серый, иногда чуть бронзовый. Блеск сильный, металлический. Твердость 6. Иногда слабо заметна спайность. В сплошных массах образует зернистые и шестоватые агрегаты.

Образуется в высоко- и среднетемпературных месторождениях; в последних часто является спутником самородного золота. Встречается в скарнах. Используется для извлечения мышьяка.

Узнается по серым удлиненным кристаллам с грубой штриховкой и по высокой твердости. При ударе молотком издает чесночный запах.

Месторождения. Известно множество месторождений, где арсенопирит является главным минералом: Урал (Кочкарское, Джетыгаринское), Средняя Азия (Уч-Имчак, Такели), Восточная Сибирь (Дарасунское, Запокровское), Швеция (Болиден).

☉ **Скуттеруудит – никельскуттерудит Co<sub>4</sub>(As<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – Ni<sub>4</sub>(As<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**. Сингония кубическая. Скуттерудит назван по месту Скуттеруд (в Норвегии), где он был впервые найден. Кристаллы в виде комбинации куба, октаэдра, но чаще встречается в зернистых массах и в виде сростаний с другими арсенидами и сульфидами (герсдорфитом, никелином). Цвет светлый стально-серый. Блеск металлический. Твердость 5,5 (ниже, чем у сходного с ним по цвету арсенопирита). Плотность 6,4–6,8 г/см<sup>3</sup>.

Образуются в среднетемпературных гидротермальных месторождениях. Характерна ассоциация с урановыми никелевыми, серебряными минералами и кальцитом. Являются рудой на кобальт и никель.

Выветриваясь, скуттерудит замещается с поверхности розоватым порошком кобальтовых цветов – эритрина, им же окрашиваются окружающие минералы – кальцит и др.; никельскуттерудит замещается зелеными никелевыми выцветами – аннабергитом.

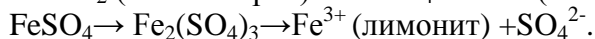
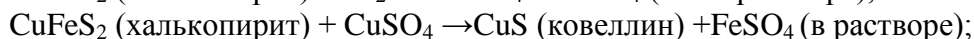
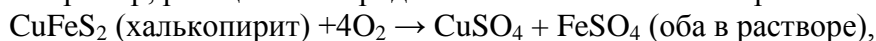
Узнаются по кобальтовым и никелевым выцветам, серебряному цвету. От арсенопирита отличаются более частой ассоциацией с кальцитом, по выцветам, по меньшей твердости, ровным (без штриховки) граням, форме кристаллов.

Месторождения. Скуттеруд (Норвегия), Кобальт (Онтарио, Канада), месторождения рудных гор – Яхимов (Чехия), Шнееберг, Аннаберг (Саксония).

## ПРОЦЕССЫ ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИДОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ УСЛОВИЯХ

Сульфиды очень подвержены вторичным изменениям и в приповерхностных условиях в средах богатых водой и кислородом (т.е. выше уровня грунтовых вод, в зоне просачивания) большинство сульфидов легко окисляется. Основные факторы окисления это: кислород, бактерии и электрохимические реакции.

Например, реакция кислородного окисления халькопирита:



Этими процессами можно объяснить образование ковеллина и лимонита за счет окисления халькопирита.

Электрохимические реакции обусловлены тем, что на контактах сульфидов разного состава возникает электродвижущая сила, способствующая выносу ионов серы и железа.

Мощным фактором окисления сульфидов являются бактерии. Живые клетки являются окислителями, а в 1 мл растворов или в 1 г руды содержится порядка 10<sup>8</sup>–10<sup>9</sup> клеток.

В результате совместного действия трех вышеуказанных факторов над первичными рудами образуются зоны (покровы) окисленных руд. Мощность зоны окисления бывает разной от долей до целых метров, а иногда и десятков метров. Зависит все от местных условий: климата, рельефа, гидрогеологических условий, трещиноватости руд, их строения и состава.

Зоны окисленных руд представляют собой яркие «шляпы» вторичных руд – железные охры, медные выцветы и пр. Их используют в качестве поисковых признаков первичных руд. Благодаря яркости, пестроте их окраски, они легко распознаются на местности, а по набору вторичных минералов можно предсказать состав первичных руд. Но главное, под зоной окисленных руд обычно имеются наиболее богатые участки. Они приурочены к зоне вторичного сульфидного обогащения, которые образуются в результате перемещения сюда по трещинам и порам рудного вещества и цементации этим веществом первичных сульфидов. Так образуются сплошные массивные наиболее богатые руды, состоящие из вещества различного происхождения: первичного и вторичного. Вверху, например, меднорудных месторождений образуется так называемая железная шляпа, представленная ячеистым лимонитом. в железной шляпе встречаются промышленные концентрации золота, которое скопилось после высвобождения золотин из сульфидов при их разложении. Ниже идет зона окисления, верхняя часть которой состоит из ноздреватого лимонита, в пустотах встречается зеленый малахит, ярко синий азурит, белоснежный ангидрит, серый прозрачный церуссит, небесно-голубой аурихальцит, зеленоватый смитсонит, голубовато-зеленая хризоколла и т.д. В средней зоне окисления – зоне вторичного обогащения сосредоточены массивные медные руды (борнит, халькозин, ковеллин). Самая нижняя зона окисленных руд представлена пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом, т. е. свинцовыми и цинковыми рудами.

## ОКСИДЫ

К оксидам относятся простые по своей природе минералы, такие как кварц  $\text{SiO}_2$ , корунд  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , пиролюзит  $\text{MnO}_2$ , касситерит  $\text{SnO}_2$ , магнетит  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ , шпинель  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  и т. д. Главным по распространенности является кварц (около 13 % массы земной коры), оксиды железа (гематит и магнетит), оксиды марганца (пиролюзит и др.). Многие из них имеют большую практическую ценность: как источники извлечения металлов (железо, титан, марганец, хром, олово); как особо твердые материалы для изготовления абразивных порошков (корунд, шпинель); как минеральное сырье с определенными свойствами: пьезоэлектрик (кварц), генераторы лазерного излучения (корунд). К оксидам также относятся многие ювелирные разновидности минералов – рубин и сапфир, шпинель (лал).

В оксидах единственным анионом является кислород, но разнообразие других компонентов очень велико. Это типичные металлы (железо, титан), полуметаллы (мышьяк, сурьма), химические элементы с амфотерными свойствами (алюминий). Химические связи между ионами различные: металлические, ковалентные, ионные, смешанные. Все это приводит к большому разнообразию структур оксидов. Среди оксидов выделяют две группы – простые и двойные. Простые – это оксиды типа  $\text{RO}$ ,  $\text{RO}_2$ ,  $\text{R}_2\text{O}_3$  и т. п. Выделение сложных оксидов довольно условно, это оксиды типа  $\text{R}_x\text{R}_y\text{O}_z$ , например,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{FeTiO}_3$ ,  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ . Отличие двойных кислот от солей кислородных кислот, которые имеют внешне такое же написание формулы (перовскит  $\text{CaTiO}_3$ , кальцит  $\text{CaCO}_3$ , шеелит  $\text{CaWO}_4$  и др.) в том, что соли в структуре имеют обособленные анионные группировки – комплексные ионы, а оксиды их не имеют. Хотя некоторые минералы имеют структуру, которая не позволяет с уверенностью отнести их той или иной группе, например, вольфрамит  $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$  в одних учебниках относится к солям, а в других к оксидам.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☉ **Куприт  $\text{Cu}_2\text{O}$** . Синоним красная медная руда. Сингония кубическая. Иногда образует хорошие октаэдры с алмазным блеском на гранях, чаще встречается в плотных зернистых массах с металловидным и жирным блеском. Цвет густой вишнево-коричневый. Иногда заметна спайность. Черта кирпично-коричневая, при растирании вторым бисквитом буреет и зеленеет – в этом отличие минерала от оксидов и гидрооксидов железа. Образуется как промежуточный продукт в зоне окисления халькопирита и других медно-сульфидных руд, где ассоциирует с самородной медью, малахитом и азуритом. Тв. 3,5–4. Плотность 3,5–4 г/см<sup>3</sup>.

Узнается по цвету, кристаллам, ассоциации.

Сейчас встречается редко. В больших количествах и в хорошо образованных кристаллах встречается в ряде месторождений Урала (Меднорудянке, Турьинских рудниках), Алтая и др.

☉ **Тенорит  $\text{CuO}$** . Кристаллы очень редки. Чаще встречается в виде черной железно-серой пыли и пленок на окисленных поверхностях самородной меди, реже образует сплошные землистые и порошковатые скопления среди окисленных медных руд разного состава. Черта черная.

☉ **Корунд  $\text{Al}_2\text{O}_3$** . Тригональная сингония. Изоморфные примеси Cr, Ti, Fe. По структуре является одним из классических примеров гексагональной плотнейшей упаковки атомов кислорода, в которой 2/3 октаэдрических пустот заселены атомами алюминия. Прочные ионно-ковалентные связи и плотнейшая упаковка сказываются на свойствах минерала – его очень высокой твердости (9) и повышенной плотности (4,0 г/см<sup>3</sup>, почти такая же как, например, у халькопирита  $\text{CuFeS}_2$  и некоторых других типично рудных минералов). Форма кристаллов зависит от условий их образования – столбчатая, бочонковидная, пирамидальная, пластинчатая. Для корунда характерны полисинтетические двойники, что приводит к появлению на гранях призмы, дипирамид и пинакоида косой штриховки.

Помимо одиночных кристаллов корунд нередко слагает сплошные зернистые массы, называемые наждаками.

Цвет (у химически чистого) белый, рубиновый (в присутствии хрома), сапфировый (в присутствии Fe и Ti), желтый (от примеси Fe). Блеск стеклянный. Иногда в кристаллах проявлена грубая отдельность. Спайность весьма несовершенная. Часто накапливается в россыпях.

Происхождение: 1) контактово-метасоматические (кристаллы часто ювелирного качества) – Кыштымский р-н Урала (наждаки);

2) регионально-метаморфические за счет глинистых осадков (Семиз-Бугу, Казахстан).

Месторождения. Россыпные месторождения рубина и сапфира известны в Бирме, Таиланде, Австралии (сапфир).

## ЛЕКЦИЯ 6

### Оксиды

☉ **Гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$** . (от греч. «гематикос» – кровавый). Примеси Ti, Mg. Структура такая же, как у корунда, но позиции алюминия заняты железом. Состоит на 70 % из железа. Сингония тригональная. Кристаллы имеют форму шестиугольных пластинок и более сложных таблитчатых кристаллов. Часто встречается в землистых массах, натечных агрегатах, называемым красным железняком. Крупные почкообразные формы с радиальнолучистым строением носят название «красной стеклянной головы». У кристаллов цвет черный, блеск полуметаллический. Цвет натечных и землистых масс яркий, кирпично-красный, блеск стеклянный или матовый. В тонких сколах просвечивает красным. Во всех случаях черта характерного вишнево-красного цвета.

Твердость 5,5–6. Спайность отсутствует. Характерна грубая отдельность по ромбоэдру. Плотность 5–5,2 г/см<sup>3</sup>.

Важный рудный минерал. Порошковатый гематит используют в качестве красок и для изготовления красных карандашей.

Образование: 1) гидротермально измененные оливиниты – в них гематит вместе с тальком образуется на месте оливина (Шабры, Урал; 2) кварцевые жилы с гематитом (на о. Эльба, гематитовые розы из Сен-Готтарда и др. в Альпах); 3) скарны – в них гематит встречается с эпидотом и кварцем (горы Высокая и Благодать, Урал); 4) кварциты, сланцы и другие регионально-метаморфические породы (Кривой Рог, Украина; оз. Верхнее, США; шт. Минас-Жерайс, Бразилия); 5) зона окисления железных руд и латериты, где гематит является в условиях засушливого климата наиболее устойчивой формой существования железа (оолитовые красные железняки на западном склоне Среднего Урала – Кузье-Александровский и Пашинский р-ны и др.).

Узнается по цвету черты, блеску и по другим признакам.

☉ **Группа кварца SiO<sub>2</sub>**. Происхождение названия остается неизвестным. Группа названа по ее главному минералу – кварцу, вернее по его низкотемпературной разновидности α-кварцу. Она объединяет различные полиморфные модификации SiO<sub>2</sub> – α- и β-кварц, α- и β-тридимит, α- и β-кristобалит, стишовит, коэсит и другие (сейчас их известно 12). Во всех этих модификациях, кроме стишовита, кремний образует с кислородом плотные тетраэдрические группировки (SiO<sub>4</sub>)<sup>4-</sup>. В них он располагается между четырьмя прилегающими друг к другу атомами кислорода. Связи между кислородом и кремнием смешанные ионно-ковалентные, тетраэдры соединяются друг с другом через свои вершины (через атомы кислорода), образуя бесконечный трехмерный каркас с «полостями» между тетраэдрами. Появление полиморфных модификаций кварца обусловлено различным разворотом тетраэдров друг относительно друга. Сингония полиморфных модификаций разная кубическая, гексагональная, тетрагональная, тригональная, ромбическая, моноклинная. Также различны облик и свойства кристаллов. Особой формой нахождения кремнезема в природе в приповерхностных условиях и в биосфере являются опалы – твердые гидрогели кремнезема, в которых кристаллическая тонкодисперсная фаза представлена некоторыми из модификаций SiO<sub>2</sub>.

СТИШОВИТ имеет принципиально другую, чем у кварца и других его модификаций структуру (структуру рутила): кремний окружен шестью атомами кислорода, он как бы сидит в центре кислородного октаэдра. Поэтому структура стишовита более компактна. И плотность его выше (4,4 против 2,6 г/см<sup>3</sup> у других модификаций кварца). Образуется в особых условиях – при сверхвысоких давлениях, например в метеоритных кратерах. Возможно, в глубинных частях Земли SiO<sub>2</sub> может существовать только в таком виде.

**α-Кварц** (низкотемпературный) слагает около 13 % земной коры, т. е. по распространенности является вторым после полевых шпатов минералом. Кристаллизуется в тригональной сингонии. Структура его представляет бесконечный трехмерный каркас, образованный вязью кремнекислородных тетраэдров (SiO<sub>4</sub>)<sup>4-</sup>. Тетраэдры располагаются спиралями, при этом кремний и кислород связаны между собой ионно-ковалентными связями, тетраэдры соединяются друг с другом через вершины (через атомы кислорода). Каждая вершина принадлежит двум тетраэдрам. На один тетраэдр с его четырьмя вершинами приходится два атома кислорода. Отсюда и формула кварца SiO<sub>2</sub>.

Структура кварца содержит винтовую ось симметрии третьего порядка. Она как бы совмещает друг с другом тетраэдры по правилу «буравчика». При полном обороте тетраэдры трижды совмещаются друг с другом. Более того, оказывается, что вращение винтовых осей может происходить как вправо, так и влево – по этому признаку выделяют две структурные разновидности минерала: правый и левый.

Свойства структуры кварца проявляются в его физических свойствах и морфологии кристаллов. Большая доля ковалентных связей обеспечивает большую твердость кварца – 7 по шкале Мооса и отсутствие спайности. «Рыхлость» строения каркаса обуславливает

малую плотность минерала (2,65 г/см<sup>3</sup>). Характер связей выражается также и в хорошей прозрачности кристаллов кварца, невысоком показателе преломления (1,54), стеклянном блеске.

Наличие тройных винтовых осей внешне выражено в том, что кристаллы кварца имеют тригональный (псевдогексагональный) облик пониженной симметричности: в них нет ни центра инверсии, ни зеркальных плоскостей симметрии. В идеале кристаллы образованы шестью сильно развитыми вертикальными гранями гексагональной призмы (с грубой штриховкой поперек граней<sup>2</sup>), замыкающимися сверху двумя ромбоэдрами (по три малых и больших граней). Внешняя симметричность кажущаяся, т. к. она резко снижается мельчайшими скосами на гранях призмы – это грани трапецоэдра (на кристаллах правого кварца они располагаются на призме вверху справа, а на левом кварце – слева). В результате набор элементов симметрии простой  $L_33L_2$ . Вдоль осей  $L_2$  в кристаллах кварца наиболее сильно проявлены его пьезоэлектрические свойства. При сдавливании пьезоэлемента вдоль оси с физически неравнозначными концами степень сжатия окажется разной на противоположных концах, и за счет нарушения электростатического поля между концами пластинки возникнет разность потенциалов, и наоборот, при создании разности потенциалов на концах пластинки она расширяется или сжимается. Кварц – это ценнейшее пьезоэлектрическое сырье, однако качество его высоко только в бездефектных и несдвоенных кристаллах.

Для кварца характерно двойникование. Установлено 6 видов двойников, из них наиболее распространены дофинейский, бразильский и японский. В дофинейских срastaются кристаллы либо левых, либо правых кварцев. В бразильских двойниках срastaются кристаллы левого и правого кварца, а в японских кристаллы срastaются по тригональной дипирамиде и двойники наклонены друг к другу под углом 84°34'.

Кварц может встречаться в одиночных кристаллах, сростках кристаллов (друзах, щетках), в зернистых массах, в виде галек и песчинок (в осадочных породах), в виде сплошных масс и прожилков.

Окраска кварца различна и по цвету и по своей природе. Кварц с примесью  $Fe^{3+}$  и внедрившимися в межузельное пространство катионов щелочных металлов обладает фиолетовым цветом – аметист. Кварц с такой же примесью алюминия и катионов щелочных металлов имеет буро-черный цвет и называется морионом. Бесцветная, фиолетовая и дымчатая окраски – это собственные окраски кварца, обусловленные его составом и структурой. Из числа разновидностей кварца с ложной окраской наиболее распространены молочн-белый кварц и зеленый (празем). Первый обычно наполнен мельчайшими (десятые и сотые доли мм) остаточными включениями природных растворов, из которых рос кварц, или в других случаях разбит тончайшими трещинками; в праземе рассеяны мельчайшие иголки актинолита.

Особая морфологическая разновидность кварца (скрытокристаллическая) – халцедон – представляет собой тонковолокнистые, скрытокристаллические агрегаты слоисто-концентрического, полосчатого, однородного, всегда тонкопористого сложения.

Происхождение кварца. Образуется кварц в разных условиях:

- 1) как продукт кристаллизации кислых магм;
- 2) как гидротермальный минерал в скарнах, рудных и нерудных жилах;
- 3) как составная часть метаморфических горных пород;
- 4) как минерал осадочных горных пород.

Промышленное значение для разработки кварца как пьезосырья и ограночного материала имеют гранитные пегматиты топазо-бериллового типа и жилы горного хрусталя или мориона среди сланцев (их называют по местам первых находок жилами альпийского типа), в них иногда добывают прозрачные хорошие кристаллы кварца массой до 500 кг. Кварц из отходов этого производства используется для выплавки жаростойкого стекла и в

---

<sup>2</sup> Штриховка называется комбинационной, т. к. она образована комбинацией тончайших поверхностей самой призмы и ромбоэдра.

качестве сырья для выращивания искусственных (бездефектных) кристаллов пьезокварца. Промышленное значение для стекольной промышленности имеют белые кварцевые пески. Халцедон как поделочный камень добывают в миароловых и других минерализованных полостях в эффузивах (базальтах).

Бесцветные разновидности используются в оптических приборах, в точной механике (особенно технический агат) для изготовления опорных призм, часовых камней и т.д. В радиотехнике – пьезокварц. Из плавленного кварца изготавливается химическая посуда, кварцевые лампы. В стекольно-керамической промышленности (пески). Для производства карборунда (твердость выше, чем у корунда), в качестве абразива и т.д. Кварциты и яшмы – декоративно-поделочный и облицовочный материал.

Кварц легко узнается по призматическим кристаллам с поперечной штриховкой, раковистому излому, твердости (7), стеклянному или жирному блеску.

**β-кварц** обычно называют высокотемпературным. Он кристаллизуется в виде хорошо ограненных дипирамидальных кристаллов гексагональной сингонии. Такой кварц образует порфиновые вкрапленники в кислых эффузивах и при понижении температуры псевдоморфно замещаются низкотемпературным α-кварцем.

**Тридимит и кристобалит** встречаются в кислых эффузивных горных породах. (тридимит по греч. – тройной, из-за часто наблюдаемых тройников). Кристобалит назван по местности Сан-Кристобал (Мексика). Тридимит встречается в ромбической α-тридимит (низкотемпературный) и гексагональной β-тридимит (более высокотемпературный) сингониях. Кристобалит β-разновидность (более высокотемпературная) – кубической сингонии, α-кристобалит – тетрагональной сингонии. Эти две разновидности кварца встречаются совместно. Изредка они наблюдаются в виде мелких кристалликов, вкрапленных в основную массу эффузивов. Встречаются также розетковидные или черепитчатые кристаллы в пустотах эффузивных пород.

**Опал  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$**  (твердый гидрогель переменного состава). (происхождение названия неизвестно). Обычно наблюдается в виде плотных полупрозрачных кле- и стеклоподобных масс, жилках, натечных агрегатах. Бесцветный, молочный, зеленый, бурый, черный, радужный (опалесцирующий). Блеск стеклянный, восковой, матовый. Твердость около 5–5,5.

Своеобразна структура опалов. Некоторые из них вообще аморфны. Другие состоят из глобул кремнезема (тридимита или кристобалита) размером от 150 до 400 нм, расположенных по закону плотнейшей кубической упаковки. В пространстве между глобулами концентрируется вода, в разном количестве в зависимости от размера глобул и степени их упорядоченности.

Особенностями строения гидрогеля объясняется характер окраски благородных опалов. Они опалесцируют и радужно иризируют за счет интерференции (дифракции) света, проходящего через плотно упакованные глобулы кремнезема. Бурая, зеленая. Коричневая, черная окраски опала возникают за счет вростков пигментирующих веществ – зеленого гарниерита, бурого железняка, черного пиролюзита и др.

Кристаллизуется из гейзерных вод, образуется при поверхностном выветривании полевых шпатов и других силикатов, выпадает в осадок за счет коагуляции гелей кремнезема в прибрежных зонах морских бассейнов, слагает твердые ткани всех диатомовых водорослей, жгутиковых, некоторых радиолярий и т.д. Золи кремнезема способны пропитывать отмершие стволы деревьев и, отлагая опал, полностью их замещать с сохранением всех деталей строения. Такие окаменевшие деревья часто встречаются в вулканических областях в пределах ареалов распространения лесов третичного периода, однако декоративные разновидности редки (в районах молодой вулканической деятельности в геосинклинальных и платформенных районах Северо-Востока Сибири в аллювии рек Лены, Вилюя, Витима и др.). Опаловые породы (опоки, трепелы, диатомиты) применяются для изготовления фильтров, в производстве керамики, для полировки металлов, в качестве термоизоляторов, в химической, пищевой, нефтяной промышленности. Благородный опал – поделоч-



ный камень. В известняках опал – вредная примесь, портящая, получаемый из него цемент и известь. В окаменелых деревьях, залегающих в пеплах, встречается благородный опал, выполняющий трещинки (США, шт. Невада).

## ГРУППА РУТИЛА

В эту группу входят соединения типа  $AХ_2$ , кристаллизующиеся преимущественно в тетрагональной сингонии: двуокиси титана, олова, марганца и свинца (главные минералы – рутил, брукит, анатаз, касситерит, пиролюзит, стишовит). Так как размеры ионных радиусов всех этих ионов примерно одного порядка, то кристаллическая структура большинства минералов будет оставаться однотипной.

Все относящиеся сюда главные минералы не связаны друг с другом и образуются в разных геологических условиях.

☉ **Рутил  $TiO_2$** . Название – от лат. «рутилу» – красноватый. Он является наиболее устойчивой модификацией  $TiO_2$  как при высоких, так и при низких давлениях. Сингония тетрагональная. Обычен в шестоватых и игольчатых кристаллах, нередко хорошо ограниченных (простые формы – тетрагональные дипирамиды и призма). Структура рутила сложена цепочками октаэдров  $(TiO_6)^{8-}$ . В каждой цепочке соседние октаэдры соединены ребрами. Оси всех цепочек в структуре рутила параллельны друг другу, в этом же направлении обычно вытянуты сами кристаллы рутила. Каждая цепочка развернута относительно другой на  $90^\circ$  и соединена с ней через вершины октаэдров  $(TiO_6)^{8-}$ . Между цепочками тянутся бесконечные каналы. Такую же структуру имеют касситерит, пиролюзит и стишовит. Твердость 6. Плотность 4,2–4,3 г/см<sup>3</sup>. Цвет черный, красно-коричневый, черта светлая коричневая, блеск алмазный. Характерна спайность по призме.

Встречается в разных месторождениях. Особенно характерен в кварцевых жилах среди метаморфических пород, где встречаются его эффектные включения в кварце. Накапливается в россыпях (россыпи Среднего Урала) и используется как руда на титан.

☉ **Анатаз  $TiO_2$** . (тетрагональная сингония). Структура характеризуется плотнейшей кубической упаковкой ионов кислорода с вертикальной четверной осью. Встречается в виде одиночных бурых, коричневых, иссиня-черных кристаллов, нарастающих на горный хрусталь в кварцевых жилах среди метаморфических пород. Редок.

Есть еще одна полиморфная разновидность  $TiO_2$  – **брукит**, кристаллизующийся в ромбической сингонии. Его структура аналогична структуре ромбического танталита и колумбита. Она характеризуется в идеализированном виде плотнейшей «топазовой» гексагональной упаковкой ионов кислорода. Кристаллы уплощенные, цвет желто- или красно-бурый до черного. Черта бесцветная до буровато-желтой. Блеск алмазный. Твердость 5–6. Плотность 3,9–4 г/см<sup>3</sup>. Встречается в жилах альпийского типа, иногда в россыпях.

☉ **Касситерит  $SnO_2$** . Тетрагональная сингония (касситерос по-греч. олово). Кристаллы хорошо образованные – призматические, шестоватые, игольчатые, со штриховкой вдоль удлинения. Часты двойники. Блеск алмазный на гранях, жирный в мелкозернистых сплошных массах. Твердость 6–7. Очень тяжелый (плотность 6,8–7 г/см<sup>3</sup>). Цвет красный, коричневый, коричнево-черный. Черты нет или очень светлая.

Образуется в гранитных пегматитах, в грейзенах, высокотемпературных гидротермальных месторождениях и скарнах. Накапливается в россыпях. Добывается как руда на олово.

В сплошных массах узнается с трудом. Может помочь реакция на оловянное зеркало: если его положить на нагретую цинковую пластинку и смочить разбавленной соляной кислотой, то он с поверхности покрывается тонким налетом металлического олова, которое становится блестящим, если его потереть.

## ЛЕКЦИЯ 7

☉ **Пирролюзит  $MnO_2$** . По-гречески «пирос» - огонь, «люзиос» – уничтожающий (употребляется в стеклоделии для уничтожения зеленого оттенка стекла). Содержит 63 % марганца. Тетрагональная сингония. Кристаллическая структура аналогична структуре рутила и касситерита. В кристаллах исключительно редок. Обычен в виде землистых масс и оолитов. Цвет черный. Блеск матовый. Черта черная.

Встречается в промышленных количествах как руда на марганец в виде пропластов и линз среди осадочных горных пород и в виде землистых масс в зонах окисления некоторых руд и горных пород. Вообще же является наиболее устойчивой формой существования марганца в зонах окисления.

Узнается по оолитам, черной черте, маркости. Если на черту пирролюзита нанести одну каплю бензидина, образуется сине-зеленое пятно.

Месторождения. Никопольское (Украина), Чиатурское (Грузия), Платтен (Чехия)

☉ **Ильменит  $(Fe, Mg, Mn)TiO_3$** . Упрощенно –  **$FeTiO_3$** . Синоним титанистый железняк. Сингония тригональная. Кристаллы шестиугольные таблитчатые или пластинчатые черного цвета, с металлическим блеском. Черта черная. Иногда слабо магнитен. Твердость около 5,5. Руда на титан и железо

В промышленных количествах встречается в виде гнезд, прожилков, пластовых залежей в пироксенитах и габбро, в россыпях в песчаниках. Характерен для щелочных пород, где он встречается вместе с нефелином и цирконом, для кимберлитов, но промышленных скоплений здесь не образует.

Очень похож на магнетит, отличается слабой магнитностью или немагнитностью и формой кристаллов.

Прибрежные титаноциркониевые россыпи с ильменитом, рутилом, лейкоксеном, цирконом – «черные пески» – это один из главных источников получения титана и циркония из прибрежно-морских россыпей.

## ГРУППА ШПИНЕЛИ

☉ **Шпинель  $MgAl_2O_4$** . Изоморфные примеси  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Mn, Cr, Zn и др. Происхождение названия неизвестно. Кубическая сингония. Кристаллическая структура минерала приближается к плотнейшей кубической упаковке кислорода, пустоты в которой заняты ионами  $Mg^{2+}$  (радиус 0,078 нм) и  $Al^{3+}$  (радиус 0,057 нм) – по В. М. Гольдшмидту. Шпинель, словно отражая модель своего кристаллического строения, образует идеально развитые октаэдрические, иногда более сложные кристаллы, имеет очень высокую твердость (7,5–8) и повышенную плотность – 3,6 г/см<sup>3</sup>. Строение кристаллической решетки шпинели до сих пор вызывает споры у ученых, которые спорят о том, какие места в кристаллической решетке занимают ионы магния, алюминия и кислорода.

Цвет шпинели разный. Идеально чистое вещество должно быть бесцветным. От примесей хрома окраска становится розовой, красной, от железа – зеленой, зелено-черной, синей (от соотношения 2-х и 3-х валентного железа). Блеск стеклянный.

Шпинель является минералом высоких давлений и температур. Она образуется в метаморфических высокомагнезиальных породах: 1) в мраморах и кальцифирах; 2) как один из реакционных минералов при процессах метаморфизма пегматитовых жил и других полевошпатовых пород, залегающих среди мраморов; 3) как один из минералов кальцифириров – метасоматических пород в архейских сланцах и гнейсах. Очень своеобразна минеральная ассоциация всех этих месторождений – это кальцит, диопсид, форстерит, флогопит. Шпинель здесь представлена одиночными кристаллами. Розовые, красные, лиловые кристаллы используются как драгоценный камень.

Узнается по одиночной вкрапленности кристаллов, их форме, высокой твердости. Запрещенная ассоциация – это шпинель и кварц.

☺ **Магнетит  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$** . Главная руда на железо. Содержит более 72 % железа. Состав очень сложен, всегда есть изоморфные примеси разных элементов; титана (титаномагнетит), алюминия, магния, хрома, ванадия, марганца, кремния и др. Поэтому содержание железа в магнетитовых рудах в целом обычно ниже теоретического. Примеси есть вредные, а есть и легирующие.

Облик минерала запомнить несложно. В сплошных штуфах он напоминает каменный уголь. Железный, чуть сероватый, тускло-блестящий, сильный лишь на гранях (блеск полуметаллический), часто с синей побежалостью, с неровным кое-где раковистым изломом, он очень тяжелый, плотность 4,9–5,2 г/см<sup>3</sup> (кусок магнетита размером с яблоко имеет массу до 1,5 кг). У него сравнительно высокая твердость (5,5–6), т.е. на стекле оставляет четкую царапину. Но особенно характерны для магнетита красивые черно-серые кристаллы. Часто они довольно крупные (1–5 см).

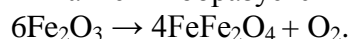
Кристаллическая структура магнетита аналогична структуре шпинели, но распределение в ней атомов по тетраэдрическим и октаэдрическим пустотам сложно и непостоянно, что делает магнетит неустойчивым минералом. Образуюсь при высоких температурах в виде гомогенной фазы, он распадается затем на смесь минеральных фаз. Магнетит встречается в октаэдрических кристаллах, в виде зернистых вкраплений и жилков, сплошных масс. Сильно магнитен. Магнитные свойства зависят от его состава: чем больше примесей Mg, Mn, тем меньше магнитная восприимчивость минерала и ниже точка Кюри. Может быть полярно магнитен. В полярно намагниченных рудах могут быть участки не притягивающие, а отталкивающие стрелку компаса; стоит поднести другой конец стрелки, как он притягивается.

Магнетит образуется в различных геологических условиях. Промышленное значение как железорудные имеют следующие типы месторождений:

1) Магнетитовые залежи и вкрапленность в оливинитах, перидотитах и габбро. Таковы крупнейшие месторождения Швеции – Кирунаваара и Люоссаваара, Качканарское месторождений в Екатеринбургской области, Кручининское в Читинской, Бушвельд в Африке и ряд других. Важны и интересны магнетитовые руды этого типа, что в их состав, помимо железа, могут входить примеси титана, ванадия, а также платины.

2) Скарны. В этих месторождениях руды магнетита образуются за счет привноса железа в растворе или за счет высвобождения его из содержащих железо силикатов – пироксена и андрадита (Урал).

3) Железистые кварциты. В них магнетит образуется по реакции



Наибольшие скопления железа сконцентрированы именно в этом типе месторождений. Это наиболее известные месторождения мира: месторождения КМА (и среди них Стойленское, Лебединское, Салтыковское, Михайловское и др.), месторождения Криворожского бассейна (Скелеветское, Ингулетское, Новокриворожское и др.), Оленегорское в Карелии, Лабрадор (Нью-Фаунленд) в Канаде, большая группа месторождений у озера Верхнего (США) и др.

При выветривании магнетит, окисляясь переходит в гематит. Такая псевдоморфоза называется мартитом. Мартитовые руды также имеют промышленное значение.

☺ **Хромит  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$** . Изоморфные примеси Mg, Al, Mn и др. Это целая группа минералов. В природе чистый хромит встречается редко. В практике разведочного и горного дела эта группа минералов называется хромитами, хотя на самом деле они называются хромшпинелидами (хромит, магнохромит, алюмохромит и др.). Кристаллическая структура аналогична шпинели. Встречается в зернах и в сплошных зернистых агрегатах. Цвет черный, черно-бурый. Блеск жирный, металловидный. Очень характерная черта – коричневая, буро-коричневая, зелено-коричневая. Твердость разная – от 5,5 до 7,5 (возрастает с увеличением примеси алюминия). Иногда слабо магнитен.

Хромит настолько связан с ультраосновными горными породами (дунитами, перидотитами и серпентинитами), что легко узнается по ассоциации минералов (оливину, сер-

пентину). Часто сопровождается вторичными силикатами яркой окраски – изумрудно-зеленым уваровитом, фиолетово-розовыми хромовыми хлоритами.

Является единственным рудным минералом хрома. Узнается с трудом из-за своей неприметности и сходства с магнетитом. Однако, хромит почти всегда не магнитен и имеет не черную, а буровато- или зеленовато-черную черту (цветную). Твердость выше, чем у магнетита, а также характерные ассоциации с клееподобными желтыми, зелеными масса-ми серпентина и фиолетово-розовыми вкраплениями и примазками хромсодержащих хлоритов (кочубейта, кеммерерита).

☉ **Хризоберилл  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$** . «Хризос» по-гречески – золото. Цвет его золотисто-желтый. Сингония ромбическая. Кристаллы таблитчатой или призматической формы обычно образуют двойники и тройники, имеющие вид псевдогексагональных кристаллов со штриховкой на гранях. Блеск стеклянный

Огромной популярностью пользуются переливчатые хризобериллы с эффектом кошачьего глаза – цимофаны. Этот эффект обусловлен тем, что в минерале имеются микроскопические каналы, расположенные параллельно оптической оси. Александрит – разновидность хризоберилла, которая имеет изумрудно-зеленую окраску при дневном свете и фиолетово-красную при электрическом.

Желтая и зеленовато-желтая окраска объясняется присутствием ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , а александритовая – ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . Накапливается в россыпях.

Хризобериллы встречаются в бериллоносных пегматитах Урала, шт. Минас-Жерайс (Бразилия), Шри-Ланки и Мадагаскара, США (шт. Колорадо, Коннектикут и Мэн), а также среди флогопитоносных слюдитов – аналогов грейзенов. Российские александриты считаются лучшими и считаются эталоном качества.

☉ **Перовскит  $\text{CaTiO}_3$** . Назван так в честь Л. А. Перовского. По внешним формам кубический и в идеале его кристаллическая структура характеризуется кубической элементарной ячейкой. В вершинах куба располагаются атомы титана, в центре – атомы кальция, посередине ребер – ионы кислорода. Однако в природе кристаллы перовскита обладают оптической анизотропией, что является следствием микродвойникования. Спайность по кубу.

Кристаллы встречаются довольно часто, имеют кубический облик со штриховкой параллельной ребрам из-за микродвойникования. Встречаются почковидные агрегаты, в которых различимы мелкие кубики.

Цвет перовскита серовато-черный, красновато-бурый, оранжево-желтый и светло-желтый из-за несколько различающегося состава этого минерала. Он обладает большой изоморфной емкостью, поэтому в нем всегда масса различных примесей: Cr, Al, TR и др.

Черта светлая или коричневая. Блеск алмазный или смоляной. Твердость 5,5–6. Плотность 3,97–4,04 г/см<sup>3</sup>.

Встречается почти исключительно в массивах щелочных (с нефелином) горных пород, где образует рассеянную вкрапленность мельчайших черных зерен в нефелиновых сиенитах. Иногда встречаются крупные скопления в виде маковидных масс на 70–90 % сложенных перовскитом.

Перовскит считают потенциальной рудой на титан, но примеси Се и Nb ухудшают качество получаемого из таких руд металла, а отделять их очень сложно и дорого.

Вообще перовскит диагностируется с трудом, для этого нужен большой навык. В отличие от магнетита он немагнитен, имеет другую черту; в отличие от титанового граната шерломиита – намного мягче.

Сейчас создают синтетические вещества, называемые перовскитом, но на самом деле являющиеся аналогами перовскитовой структуры  $\text{CdTiO}_3$ ,  $\text{CaSnO}_3$ ,  $\text{BaThO}_3$ ,  $\text{LaFeO}_3$  и многие другие. Все они являются высокотемпературными сверхпроводниками и обладают ярко выраженными пьезоэлектрическими свойствами.

Другой аспект структуры перовскита заключается в том, что она очень компактна. Считается, что именно такой структурой обладают минералы в глубинных частях Земли вещества пироксенового состава – типа  $MgSiO_3$ ,  $FeSiO_3$ .

☺ **Группа колумбита (ниобита).** К ней относятся минералы изоморфного ряда  $(Fe,Mn)Nb_2O_6$  –  $(Fe,Mn)Ta_2O_6$ . Они образуют толстотаблитчатые черные кристаллы со штриховкой на гранях. Блеск на гранях металлический, в изломе матовый (излом шероховатый). Твердость около 6. Характерна высокая плотность: у чисто ниобиевых разновидностей около 5,2, у танталовых до 8,2 г/см<sup>3</sup>.

Встречаются в виде рассеянной редкой вкрапленности кристаллов и зерен в метасоматически измененных гранитах, пегматитах. Используется как руда на ниобий и тантал. Узнаются с трудом. Примечательны высокая плотность, черный цвет, светлая коричневая черта.

Тантал намного ценнее, чем ниобий, поэтому важно при разведке отличить танталит от колумбита и оконтурить участки с его вкрапленностью. Предложен и использован очень простой экспресс-метод определения количества тантала в минерале по его плотности: засекают время погружения зерен минерала в длинной стеклянной трубке, заполненной какой-либо вязкой жидкостью (например, растительным маслом), затем по простой формуле вычисляют значение плотности, а по ней – содержание тантала в минерале.

☺ **Группа пирохлора.** Это группа минералов сложного переменного состава, среди них выделяют три крайних вида – ниобиевый минерал (пирохлор), танталовый (микроталит), титановый (бетафит) и очень много промежуточных разновидностей, каждая со своим названием (обручевит, гатчеттолит, пандаит, менделеевит и др.). Сейчас эти излишние названия упразднены, но все еще встречаются в литературе и засоряют ее. По главным изоморфным примесям можно говорить о тантал-урановой, тантал-ториевой, редкоземельной разновидности пирохлора, не используя собственных названий.

Общая формула упрощенно  $NaCaNb_2O_6F$ .

Пирохлор образует кристаллы в виде октаэдров и кубооктаэдров или округлые зерна. Как правило, они подвергаются метамиктному распаду и имеют вид клееподобных масс с жирным блеском и раковистым изломом, лишь в редких случаях у граней пирохлора сильный алмазный блеск. Цвет желтый, коричневый, черный. Сильно радиоактивный минерал.

Пирохлор встречается в нефелиновых пегматитах, кальцитовых жилах в пределах массивов нефелиновых сиенитов, в альбититах, фенитах, карбонатитах. Карбонатиты приурочены к массивам щелочно-ультраосновных пород на щитах. В них они образуют штоки диаметром 300–500 м, а также дайки и жилы. Карбонатит – это зернистая существенно кальцитовая или доломитовая порода с оливином, пироксеном, магнетитом, апатитом. Пирохлоровые руды разрабатываются на комплекс полезных ископаемых – ниобий, тантал, уран, редкие земли.

☺ **Вольфрамит.** Так называются минералы изоморфного ряда  $FeWO_4$  –  $MnWO_4$ . Минерал, по разным классификациям относящийся то к оксидам, то к солям кислородных кислот (вольфрамат). Сингония моноклинная. Образует черные, бурые, красно-коричневые толстотаблитчатые и призматические кристаллы с грубой штриховкой на гранях. Твердость 5. Совершенная спайность по пинакоиду (в одном направлении), перпендикулярно таблитчатости, на ней алмазный или сильный полуметаллический (зеркальный) блеск. Черта коричневая, светло-бурая, как у сфалерита. От последнего отличается спайностью (у сфалерита она в нескольких направлениях). Формой кристаллов (у сфалерита – изометричные, а у вольфрамита – вытянутые, таблитчатые). Сфалерит намного легче вольфрамита.

## ГИДРОКСИДЫ

Большинство гидроксидов является приповерхностными минералами, которые образуются при процессах выветривания разных пород и руд, в процессе осадконакопления и диагенеза. Наиболее распространены среди них – гидроксиды железа, на долю которых приходится около 0,2 % от объема земной коры, и марганца. Большинство входящих в гидроксиды химических элементов являются металлами четвертого периода таблицы Д. И. Менделеева (алюминий, уран, марганец, железо, магний, медь, ванадий и др.), образующими с гидроксил-ионами устойчивые при низких температурах и труднорастворимые в воде химические соединения.

Практическое значение имеют гидроксиды железа, марганца, алюминия, урана, бора в качестве руд на эти элементы.

### КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

В гидроксидах гидроксил-ион является единственным или доминирующим в кристаллической решетке анионом. Состав минералов обычно прост и выражается формулой  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (гиббсит),  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (брусит),  $\text{AlO}(\text{OH})$  (бёмит),  $\text{FeO}(\text{OH})$  (гётит) и т. п.

Большинство подобных соединений кристаллизуется в слоистых структурах, характеризующихся гексагональной или близкой к ней плотнейшей упаковкой ионов  $[\text{OH}]^{1-}$ . Этим объясняются многие физические свойства минералов. Наличие гидроксил-иона, одновалентного, но равного по размеру иону  $\text{O}^{2-}$ , снижает прочность химических связей в структурах гидроксидов по сравнению с чисто кислородными соединениями сходного состава. В некоторых гидроксидах (диаспор, гётит и др.) проявлена смешанная гидроксильно-водородная связь, и чтобы показать это, их формулы иногда пишут по-особому, например,  $\text{HAlO}_2$  для диаспора и  $\text{HFeO}_2$  для гётита. Так или иначе, все эти особенности часто приводят к заметным отклонениям структуры гидроксидов от принципа плотнейшей упаковки атомов.

## ЛЕКЦИЯ 8

### МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИДРОКСИДОВ

В подавляющем большинстве гидроксиды не образуют различных, заметных глазом кристаллов, и обычно форму их кристаллических индивидов можно установить лишь с помощью электронного микроскопа. Почти всегда они встречаются в порошковатых, землистых, натечных фарфоровидных массах и в виде оолитов. Исключения из этих правил единичны, они относятся к диаспору и гиббситу: в нескольких месторождениях известны их пластинчатые кристаллы размером от 0,1 до 2,3 см. Образуются в результате разрушения других минералов.

Невысокая твердость большей части гидроксидов (1–3) объясняется малой прочностью их кристаллических структур с большой долей остаточных связей, как, например, в гиббсите, где каждая трехслойная пачка  $\text{Al}(\text{OH})_3$  слабо скреплена с такими же соседними пачками. Исключение представляет диаспор в тех редких случаях, когда он образует самостоятельные кристаллы. Они обладают твердостью 6,5–7 из-за большой роли водородных (достаточно сильных) связей.

Окраска минералов разнообразная и часто пестрая. Она вызвана разными причинами: во-первых, железо и марганец сами по себе хромофоры – этим обусловлена собственная коричневая или буро-черная окраска. Во-вторых из-за тонкодисперсного строения агрегатов, в них содержится много пигментирующих механических примесей. Так, смеси гидроксидов алюминия (теоретически бесцветные) окрашены в бурые, охряные, красные цвета примесями бурого железняка и гематита.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☉ **Гидроксиды магния.** Наиболее распространен среди них **брусит  $Mg(OH)_2$** . Он имеет слоистую структуру, ее можно трактовать как близкую к гексагональной плотнейшей упаковке, в узлах которой находятся гидроксил-ионы. Каждый слой состоит из двух плоских листов, сложенных ионами гидроксила, а между ними лежит лист из катионов  $Mg^{2+}$ . Совершенная спайность проходит между такими тройными слоями. Кристаллы брусита бесцветные пластинчатые, гексагонального сечения. Минерал редок. Образуется как один из продуктов гидротермального изменения ультраосновных пород, иногда мраморов и при экзогенных процессах выветривания.

Встречается в тонкозернистых массах, кристаллах, иногда в виде параллельно-игольчатых агрегатов, называемых немалитом, немалит-асбестом.

☉ **Гидроксиды алюминия.** Наиболее распространены среди них **гиббсит  $Al(OH)_3$ , бёмит  $AlO(OH)$  и диаспор  $AlO(OH)$** . Бёмит назван по имени первооткрывателя этого минерала Бёма. Гиббсит имеет подобную бруситу слоистую структуру.

Цвет белый, серый, красный, темно-красный, бурый.

Гидроксиды алюминия в индивидуальных выделениях встречаются редко. Иногда наблюдаются отдельные кристаллы гиббсита и диаспора. Гиббсит встречается в виде бесцветных и белых пластинок гексагональных очертаний среди продуктов гидротермального изменения нефелина. Диаспор известен в пластинчатых с грубой штриховкой и сильным перламутровым блеском кристаллах сиреневого и бурого цвета в метаморфических породах. Обычно все вместе они образуют смеси с оксидами и гидроксидами железа, каолинитом и другими минералами, называемые **бокситам**. Часто имеют оолитовую структуру.

Наиболее надежно различаются рентгено-структурным методом.

Месторождения бокситов образуются, во-первых, как продукты поверхностного выветривания гранитов в тропических странах. Во-вторых, бокситы образуются осадочным путем за счет перемыва месторождений первого типа. Они являются главной рудой на алюминий. Часто встречается совместно с корундом и другими алюмосиликатами

Месторождения. Красная шапочка и другие месторождения на Урале, Акташ (Узбекистан), многочисленные месторождения США (шт. Пенсильвания, Колорадо, Арканзас, Миссури и др).

☉ **Гидроксиды железа.** Обычно это то, что мы называем ржавчиной. Наиболее распространенный гидроксид кристаллического строения – это гётит. Индивидуальные кристаллы встречаются редко: **гётит** наблюдается иногда в виде золотисто-бурых иголок среди кварца в кварц-халцедоновых жеодах или в виде сростков пластинчатых кристаллов, **лепидокрокит** образует золотисто-бронзовые слюдоподобные налеты на гематите и других окисленных минералах железа. Обычно же встречается в смесях, называемых **бурым железняком и лимонитом**. Собственно лимонитом принято считать участки руды с аморфной, не раскристаллизованной внутренней структурой. Это ржаво-коричневые до черных тонкодисперсные землистые, натечные, почковидные агрегаты, потеки, псевдоморфозы по пириту, гематиту и другим минералам, наконец, агрегаты оолитового строения. Блеск матовый или стеклянный, черта ржавая.

Образуются в результате поверхностного окисления различных руд и минералов железа, выпадают в виде коллоидно-химических осадков при формировании осадочных пород. Являются рудой на железо, порошковатые массы используются для изготовления красок.

Месторождения. Крупное месторождение оолитовых бурых железняков на Керченском п-ове, Бакальское (Ю. Урал), Елизаветинское (с. Урал), Эльзас-Лотарингия, Пршибрам (Чехия), Корнуолл (Англия) и др.

☉ **Гидроксиды марганца.** Известно около двадцати гидроксидов чистого марганца и в сочетании с другими элементами (барием, кальцием, никелем, цинком и др.). Все они похожи друг на друга. Обычно гидроксиды марганца встречаются в смеси друг с дру-

гом, пиролюзитом и другими оксидами Mn в виде черных конкреций, натечных образований (гроздьев, почек, сосуллек), землистых, оолитовых агрегатов. Нередко такие массы называют **псиломеланом**. Цвет их черный, буро-черный, черта буро-черная, маркая. Твердость от 6 до 2. точная диагностика минералов обычно осуществляется специальными лабораторными методами. Смеси, обогащенные водой, максимально буро-коричневые, рыхлые и легкие, более маркие, называются **вадами**.

Гидроксиды марганца образуются в некоторых гидротермальных месторождениях, в процессах выветривания разных марганецсодержащих минералов (образуют марганцевые шляпы), как коллоидно-химические осадки и на дне современных океанов – железомарганцевые конкреции. Фазовый и химический состав современных железомарганцевых конкреций на дне океанов и морей обычно сложен, нередко он разный в разных частях конкреций. Часто в состав конкреций входят в разных количествах цеолиты, глинистые минералы, тонкодисперсный кварц.

## СИЛИКАТЫ И ИХ АНАЛОГИ

### ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СТРУКТУР

Класс силикатов и их аналогов является самым большим по числу минеральных видов – к нему относится около 30 % от общего их числа. В целом силикаты и алюмосиликаты слагают около 75 об. % земной коры, при этом наиболее распространены полевые шпаты – на их долю приходится 40–45 об. % литосферы. За ними по распространенности следуют слюды, пироксены, амфиболы и гранаты. В соответствии с распространенностью химических элементов главными катионами в силикатах и их аналогах являются K, Na, Ca, Mg, Fe. Значительна также роль алюминия, который, как показали рентгеноструктурные исследования, может выступать как в качестве катиона, так и входить в анионный радикал минералов.

Рентгеноструктурные исследования выявили следующее:

1. Во всех силикатах атомы кремния имеют по отношению к кислороду четверную координацию, они образуют вместе с кислородом, как в кварце, кремнекислородные тетраэдры  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ . Связи кремния с кислородом смешанные ионно-ковалентные, с разной степенью ионности в минералах разной структуры и с разными катионами

2. Кремнекислородные тетраэдры могут быть одиночными, и тогда они соединяются в общей структуре минерала через катионы, но могут и полимеризоваться, образуя различные анионные группировки.

3. Алюминий в силикатах может быть катионом, а может входить в тетраэдры  $(\text{AlO}_4)^{5-}$ , занимая в структуре минерала позиции аналогичные кремнию. Например, в каолините  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$  алюминий является катионом и имеет координационное число 6, а в микроклине  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$  он входит в анионный радикал минерала, занимает такие же позиции, как и кремний, т. е. размещается в центре тетраэдров. Минералы первого типа называют силикатами, второго – алюмосиликатами. Алюмосиликаты – это аналоги силикатов. Размер тетраэдров  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  и его конфигурация иные, чем у групп  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ , характер химических связей также отличен. Поэтому существует предел замещения кремнезема  $\text{Si}^{4+}$  алюминием  $\text{Al}^{3+}$ . Установлено, что в силикатах может замещаться алюминием не более половины кремния в тетраэдрах, например,  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$  – нефелин и  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$  – анортит это предельные по составу алюмосиликаты.

4. Помимо кремнекислородных анионных радикалов во многих силикатах и алюмосиликатах есть дополнительные анионы –  $\text{OH}^-$ ,  $(\text{CO}_3)^{2-}$ ,  $(\text{SO}_4)^{2-}$ ,  $(\text{S}_2)^{2-}$ ,  $(\text{BO}_3)^{3-}$ ,  $(\text{P}_2\text{O}_7)^{4-}$  и др. Так, в амфиболе и биотите есть дополнительный анион  $\text{OH}^-$ .

### СТРУКТУРНЫЕ ТИПЫ АНИОННЫХ РАДИКАЛОВ

Разнообразие структур силикатов практически безгранично. Это вызвано, во-первых, многочисленностью способов полимеризации групп  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  и  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ , при которых возникают анионные комплексы разной конфигурации и размеров. Во-вторых в со-



став силикатов и алюмосиликатов входит в общей сложности около 60–70 химических элементов с разным размером ионов и характером осуществляемых ими связей. В результате геометрия сочетаний катионов и анионных группировок может быть самой разнообразной. Поэтому рассмотрим только основные структурные типы анионных радикалов, характерных для наиболее распространенных минералов.

**Изолированные тетраэдры ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4-</sup>.** Характерны, например, для гранатов  $\text{R}_3\text{R}_2(\text{SiO}_4)_3$ , оливинов  $(\text{Mg,Fe})_2(\text{SiO}_4)$ , топаза  $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{F}_2$ . В них тетраэдры соединяются через катионы. Эти минералы можно рассматривать так же, как соли ортосиликновой кислоты  $\text{H}_2\text{SiO}_4$ , поэтому раньше их называли **ортосиликатами**.

**Сдвоенные тетраэдры.** Группы  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ , полимеризуясь, соединяются попарно через общую вершину атомом кислорода, образуя анионные радикалы  $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ , которые соединяются через катионы. Например, гемиморфит  $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Минералы с такими радикалами нередко называют **диортосиликатами**.

**Кольца тетраэдров.** Наиболее распространен кольцевой одноярусный анион из шести тетраэдров (с формулой итогового радикала  $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$ ), как у берилла, но есть минералы с кольцевыми радикалами из трех и четырех тетраэдров и со сдвоенными (двухъярусными) радикалами из четырех и шести колец.

**Цепочки тетраэдров.** Их много разных, наиболее проста и чаще всего встречается так называемая пироксеновая цепочка. Она бесконечна, имеет период повторяемости в два тетраэдра, отсюда общая формула радикала  $(\text{Si}_2\text{O}_6)$ . Примером могут служить пироксены, например, диопсид  $\text{Ca, Mg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ . Его можно трактовать как соль метакремниевой кислоты, поэтому их раньше называли метасиликатами.

**Ленты тетраэдров.** Их также много. Наиболее распространена в силикатах так называемая амфиболовая лента. Она бесконечна и как бы состоит из двух соединившихся друг с другом пироксеновых цепочек. Нередко так и говорят: пироксеновая – это одинарная, а амфиболовая – двойная цепочка. В амфиболовой ленте период повторяемости – одно кольцо тетраэдров. Формула такого анионного радикала будет  $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$ . Например, тремолит  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$  или  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ .

**Слои (сетки) тетраэдров.** Они также бывают разными. Наиболее важны каолинистые слои, поскольку они имеются в большинстве слюд, глинистых минералов, серпентинов. В каолинистых сетках тетраэдры лежат своими основаниями в одной плоскости, их вершины развернуты в одну сторону, а простейшим трафаретно повторяющимся узором является шестичленное кольцо  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ . Примерами минералов с таким анионным радикалом является каолинит  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ ,  $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_2$  или  $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ .

**Каркасные группировки тетраэдров.** В них тетраэдры соединены всеми своими четырьмя вершинами с соседними тетраэдрами, формируя таким образом бесконечную трехмерную постройку с большими «полостями» в ней. Геометрия и характер симметрии таких группировок могут быть различными из-за разной ориентации тетраэдров относительно друг друга.

Если все тетраэдры заняты кремнием, то получаются различные модификации кремнезема. Кварц и его полиморфы во многих учебниках и справочниках считаются силикатами. Если же часть тетраэдров в таком кремниевом-кислородном каркасе занята алюминием, то получаются алюмосиликаты. В качестве примера мы уже приводили анортит, нефелин, микроклин. Помимо алюминия в каркас может входить бор, как в данбурите  $\text{Ca}(\text{B}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ . Такие минералы называются боросиликатами.

Таковы главные группировки тетраэдров в силикатах и их аналогах, число их всех очень велико. Имеется еще много силикатов с нерасшифрованной структурой. Рентгеноструктурные исследования приводят к открытию все новых структур.

## КЛАССИФИКАЦИЯ СИЛИКАТОВ

Классификация силикатов и их аналогов производится по их структурам. Так выделяют шесть подклассов: островные, кольцевые, цепочечные, ленточные, слоистые, карбонатные.

К островным силикатам относятся силикаты с группами  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  и  $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ . В некоторых учебниках выделяют ортосиликаты, диортосиликаты, орто-диортосиликаты, метасиликаты, диметасиликаты. Кольцевые силикаты иногда относятся к островным силикатам, иногда к силикатам с замкнутыми цепочками. Силикаты с цепочками и лентами в некоторых учебниках и монографиях объединены под общим названием «цепочечные» (но с одинарными и двоязычными цепочками). Кварц в одних книгах относят к оксидам, в других – к силикатам. Есть классификации с нуль-, моно-, ди-, трисиликатами и т. д. Однако какими бы ни были классификации, суть минералогии, как говорил о минералогии еще В. И. Вернадский, – не в статическом описании минералов как мертвых тел, а в изучении явлений и процессов.

### ОСТРОВНЫЕ СИЛИКАТЫ

Это наиболее многочисленный подкласс минералов среди силикатов. Его типичными представителями является оливин, альмандин  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{Si}_4)_3$  и другие гранаты, топаз  $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{F}_2$ , эпидот  $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$ . Состав этих силикатов может быть разным – это минералы магния, железа, алюминия, марганца, редких земель, тория, циркония, ниобия и др. Ни в одном другом подклассе нет такого разнообразия катионов. К этому подклассу также относятся совсем особые по составу и структуре минералы – силикофосфаты, с дополнительными радикалами  $(\text{P}_2\text{O}_7)^{4-}$  и  $(\text{PO}_4)^{3-}$  (например минерал ломонсовит с приблизительной формулой  $\text{Na}_5\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{PO}_4)\text{O}_2$  и силикокарбонаты (например, спёррит  $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{CO}_3)$  и др.).

Некоторые из этих минералов очень широко распространены в природе и являются породообразующими, например, оливин, эпидот, гранат, кианит. Другие встречаются реже. Практическое значение имеет лишь ничтожная часть от общего числа этих минералов. В качестве абразивов используются гранаты. Драгоценными или полудрагоценными являются топаз, некоторые разновидности гранатов (альмандин, пироп, демантоид, уваровит), хризолит (оливин), циркон. Рудными минералами являются фенакит  $\text{Be}_2(\text{SiO}_4)$  (бериллий), тортвейтит  $\text{Sc}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)$  (скандия), виллемит и гемиморфит  $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$  (цинка), циркон  $(\text{Zr,Hf})(\text{SiO}_4)$  (цирконий и гафний).

## ЛЕКЦИЯ 9

### КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСТРОВНЫХ СИЛИКАТОВ

Кристаллохимические особенности островных силикатов определяются: 1) присутствием в минералах орто-  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  и диортогрупп  $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ ; 2) большой ролью в минералах этой группы катионов октаэдрической координации с ионными радиусами 0,060–0,080 нм<sup>3</sup> ( $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ), главными из которых являются магний и железо. Структуры силикатов этого класса наиболее прочны и компактны среди силикатов других подклассов. Во многих минералах этой подгруппы большую роль играют сравнительно крупные катионы восьмерной (и более) координации  $\text{Ca}^{2+}$  (0,106),  $\text{Na}^+$  (0,098),  $\text{Ce}^{3+}$  (0,0118). Их координационные полиэдры несоразмерны с тетраэдрами и октаэдрами, поэтому структура таких минералов за небольшим исключением (гроссуляр), менее компактна.

Характерная особенность алюминия в островных силикатах заключается в том, что он входит в состав минералов в качестве катиона – занимает октаэдрические позиции.

---

<sup>3</sup> По В. Н. Гольдшмидту.

Разнообразие катионов, их различные радиусы и свойства приводят к усложнению кристаллических структур островных силикатов и частому вхождению в их состав дополнительных анионов  $F^-$  и  $(OH)^-$ . Особенно характерно это для минералов, содержащих одновременно группы  $(SiO_4)^{4-}$  и  $(Si_2O_7)^{6-}$  и различающиеся по металлическим свойствам катионы, например, кальций и титан (титанит), кальций и алюминий (эпидот), калий, натрий и титан (лампрофиллит). Дополнительные анионы характерны также для силикатов, в состав которых входят только группы  $(SiO_4)^{4-}$  и алюминий в качестве катиона, – топаз  $Al_2(SiO_4)F_2$ , кианита  $Al_2(SiO_4)O$  и др.

Принцип строения орто- и диортосиликатов показан на схеме кристаллического строения оливина и гемиморфита  $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2H_2O$ . У оливина тетраэдрические группы  $(SiO_4)$  соединяются через катионы, а у гемиморфита комплексные анионы  $(Si_2O_7)$  соединяются через катионы.

## МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Островные силикаты даже в стесненных условиях роста чаще всего образуют хорошие кристаллы. Это объясняется большой кристаллизационной силой этих минералов, которая обусловлена компактностью и простотой их структуры, многозарядностью анионных комплексов и значительной силой связей катионов, входящих в их состав.

Естественно, что форма кристаллов обусловлена особенностями структуры. Островные силикаты кубической сингонии – гранаты образуют изометричные, хорошо ограненные зерна – ромбододекаэдры, тетрагон-триоктаэдры. В тетрагональной сингонии кристаллизуется циркон, образующий идеально развитые дипирамидальные и призматические кристаллы. В совершенных кристаллах ромбической сингонии обычно наблюдаются топаз и ставролит. Ну а сфен (сейчас его принято называть титанитом) даже получил название за то, что он почти всегда встречается в виде идеально ограненных клиновидных кристаллов (от греческого «сфен» – клин). Из распространенных кристаллов лишь оливин и хондрит редки в кристаллах.

Окраска островных силикатов обычно обусловлена присутствием в их составе в качестве главных и примесных компонентов элементов-хромофоров (Fe, Mn, Ti, и Cr). Атомы двухвалентного железа вызывают зеленые цвета (гроссуляр, эпидот), а трехвалентного – коричневые (андрадит, ставролит, титанит), а различные соотношения этих атомов обуславливают всё разнообразие цветов в зелено-коричневой части спектра. Окрашенные марганцем и железом минералы имеют малиново-красный, лилово-красный цвет (альмандин). Железо в сочетании с титаном вызывает коричнево-черную окраску минералов, например титанистый андрадит – шорломит. Хром обуславливает изумрудно-зеленую окраску минералов (уваровит). Он же в сочетании с железом вызывает бордово-красную окраску драгоценных пиропов («богемских гранатов») – при особых соотношениях хрома и железа эти гранаты могут менять цвет от зеленых при дневном свете до красно-фиолетовых при искусственном. Лишь в редких случаях могут встречаться бесцветные островные силикаты – это химически чистые гроссуляр, форстерит, топаз, каламин.

Островные силикаты имеют высокую твердость – 6–8, поэтому они черты не дают, т. к. процарапывают бисквитную пластинку, и даже у густо окрашенных минералов она еле заметна.

## ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ

Островные силикаты – это минералы преимущественно высоких температур и давлений, т. е. больших глубин. Поэтому главными типами месторождений являются магматические и метаморфические, реже метасоматические. Как исключение они могут образовываться в приповерхностных условиях.

Минералы, образующиеся в магматических породах: оливин, циркон, некоторые гранаты, титанит, лампрофиллит. Однако образуются эти минералы в разных по составу породах. Оливин является породообразующим минералом ультраосновных пород (бедных

кремнеземом), т. к. он сам содержит очень мало кремнезема. В основных, средних и кислых породах островные силикаты играют вспомогательную роль (аксессуарные минералы): титанит, циркон, некоторые гранаты. В гранитных пегматитах образуются кристаллы топазов. В щелочных горных породах (с нефелином) характерными минералами являются циркон, титанит, ринколит, лампрофиллит.

Минералы, образующиеся в метаморфических породах. В них островные силикаты нередко играют главную роль. Они образуются при региональном метаморфизме в гнейсах, сланцах: это типичные гранаты (пироп-альмандинового состава), ставролит, эпидот, кианит. В контактово-метасоматических породах (скарнах) главными минералами являются кальциевые гранаты (гроссуляр, андрадит), большую роль в них играют везувиан и эпидот. В грейзенах часто встречаются топазы, иногда фенакит. При щелочном метасоматозе (в альбититах, микроклинитах) образуются циркон, торит, фенакит.

В приповерхностных условиях образуется виллемит и каламин – минералы зоны окисления цинково-сульфидных руд.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☺ **Оливины.** Это группа минералов переменного состава, образующих почти непрерывный изоморфный ряд смесей от форстерита  $Mg_2(SiO_4)$  до фаялита  $Fe_2(SiO_4)$ . Магнезиальный член ряда форстерит встречается в мраморах, и некоторых скарнах в виде белых или желтых округлых зерен и бесформенных выделений со стекляннм или жирным блеском. Ассоциирует обычно с кальцитом, зеленой и бесцветной слюдой (флогопитом), магнетитом, шпинелью (черной и розовой), хондродитом.

Промежуточные члены ряда (оливины) встречаются в кимберлитах, ультраосновных породах, базальтах в виде одиночных зерен, плохо образованных кристаллов и зернистых масс бутылочно-зеленого, бутылочно-коричневого цвета, полупрозрачных, со стекляннм блеском. Оливины являются главной составляющей частью оливиновых пород – оливинитов, дунитов, перидотитов.

Из оливинов только фаялит встречается с кварцем. Он редок образуется в некоторых скарнах, гранитных пегматитах, гранитах, метаморфических породах. При метаморфизме оливин легко подвергается гидролизу, замещаясь серпентином и тальком.

Оливиниты используются как огнеупорное сырье, прозрачные разновидности – в ювелирном деле как ограночный материал – это хризолит.

Узнается с трудом. Требуется большой навык, чтобы его определить в породе. Чаще определяется по продуктам изменения – серпентину и тальку.

Твердость хризолита 6,5–7. Плотность 3,2–3,5 г/см<sup>3</sup>. Спайность развита плохо, излом раковистый. Блеск стекляннй, на изломе жирный. С древности наиболее известное месторождение хризолита на о. Забергед (Египет). На мировой рынок поступает из АРЕ, США и Бирмы. В России (тр. Удачная-Восточная в Якутии).

☺ **Фенакит  $Be_2(SiO_4)$ .** «Фенакис» по-гречески – обманщик; название дано из-за того, что бесцветные его разновидности почти неотличимы от кварца. Сравнительно редкий минерал. Тригональная сингония. Образует шестоватые, призматические белые кристаллы, друзы и сферолиты в гидротермальных фтор-бериллиевых рудах, где ассоциирует с полевым шпатом, бертрандитом, флюоритом. Твердость 7,5–8. Плотность 2,95–3 г/см<sup>3</sup>.

Используется как руда на бериллий. В качестве ювелирного камня встречается в пегматитах в виде крупных бесцветных прозрачных кристаллов призматического и ромбодрического габитуса. Ассоциирует здесь с топазом, амазонитом, бериллом.

Был впервые найден на Урале Л. А. Перовским.

Прозрачный фенакит обычно бесцветен. Встречаются камни бледно- и винножелтые, розоватые, реже зеленовато-серые или бурые. Окраска связана с наличием парамагнитного центра  $Be-O-Be$ . Окраска часто распределяется неравномерно, на свету она может обесцвечиваться.. Наиболее известное месторождение фенакита находится на Ура-

ле, где только в 1831–1862 гг. его было добыто более 80 кг. Красивые кристаллы и друзы фенакита желтого и бледно-красного цвета встречаются в Бразилии (шт. Минас-Жерайс).

☉ **Циркон  $Zr(SiO_4)$ .** От персидских слов «цар» – золото и «гун» – цвет. Синонимы гиацинт, энгельгардит, азорит, ауэрбахит. Характерный акцессорный минерал кислых и щелочных пород. Практически всегда содержит в том или ином количестве изоморфные примеси различных катионов (тория, церия, гафния, ниобия, тантала, алюминия), что дает основание выделять различные разновидности цирконов, которые с минералогической точки зрения ничем не оправданы. Радиоактивные разновидности (малакон, циртолит и др.) подвергаются метамиктному распаду (распад под действием собственного радиоактивного излучения). Они аморфизуются, ожелезняются и обводняются. Увеличиваясь в объеме, метамиктные зернышки циркона разбивают трещинами окружающие минералы, по ним происходит ожелезнение пород.

Кристаллизуется в тетрагональной сингонии.

Спайность у циркона наблюдается редко (несовершенная). Блеск сильный, стеклянный до алмазного, у просвечивающих камней – жирный. До матового, на изломе – смолистый. Твердость 6,5–7,5. Циркон хрупкий, что затрудняет его обработку. Плотность сильно меняется в зависимости от цвета: у зеленых и коричневых – 3,95–4,20, а у бесцветных, голубых 4,6–4,8 г/см<sup>3</sup>. Часто цирконы люминесцируют в ультрафиолетовых лучах желтым и оранжевым цветом.

Циркон очень прочен, тяжел и поэтому накапливается в песках. Промышленные концентрации образуют в россыпях. Цирконовые пески используют как формовочные пески в металлургическом производстве, для получения оксида циркония, для извлечения гафния.

Узнается по идеальной форме кристаллов, алмазному блеску, высокой твердости.

☉ **Гранаты.** Это обширная группа минералов общей формулы  $R_3^{2+}R_2^{3+}(SiO_4)_3$ . В качестве катионов типа  $R^{2+}$  выступают Ca, Mg,  $Fe^{2+}$ ,  $R^{3+}$  – Al,  $Fe^{3+}$ , Cr, реже Ti и V. Выделяются две главные подгруппы гранатов по А. Винчеллу и В. Винчеллу: железомagneзиально-марганцевые пиральспиты – пироп, альмандин и спессартин и кальциевые уграндиты – уваровит, гроссуляр и андрадит. Внутри подгрупп наблюдаются широкие изоморфные замещения, между подгруппами изоморфизм ограничен. Есть и другие по составу гранаты – ванадиевые, циркониевые, гидрогранаты.

Все гранаты относятся к кубической сингонии. Часто они образуют совершенные кристаллы в форме ромбододекаэдров, тетрагонтриоктаэдров и их комбинаций. Твердость гранатов в зависимости от состава 6,5 (андрадит)–7,5. В зависимости от состава меняются оптические свойства гранатов – показатель преломления, дисперсия (от 0,022 у пироба до 0,057 у демантоида и топазолита – разновидности андрадита), плотность (от 3,4 у уваровита до 4,2 у альмандина и спессартина). Поэтому при диагностике гранатов следует это учитывать.

Гранаты легко узнаются по форме кристаллов, окраске, твердости. Поначалу трудно диагностировать только зеленые и коричневые гранаты ряда гроссуляр – андрадит в сплошных, жирных по блеску плотных массах в роговиках и скарнах. Помогает присутствие мелких хорошо ограненных кристалликов граната вдоль кальцитовых жил.

☉ **Группа кианита (дистена).** Это минералы общего состава  $Al_2SiO_5$ . Сюда относятся два островных силиката разной структуры, кианит (дистен)  $Al_2(SiO_4)O$  и андалузит  $AlAl(SiO_4)O$ , и цепочечный алюмосиликат – силлиманит  $Al(AlSiO_5)$ . В кианите весь алюминий располагается в кислородных октаэдрах, в андалузите половина его находится в необычном (пятерном) окружении, а в силлиманите половина алюминия размещается в тетраэдрах. В этой же последовательности естественно понижается плотность минералов, т. к. чем больше координационное число атома, тем плотнее он упакован в структуре минерала между анионами (кислородом). Так же уменьшается давление, при котором эти минералы стабильны: чем больше давление, тем более компактны структуры и наоборот. Очень распространенные минералы, относятся к породообразующим.

**Кианит** (триклинный) встречается в виде удлиненных досковидных кристаллов, бесцветных и голубовато-синих, голубовато-зеленоватых, встречается фиолетовый и розовый. Название от «кианос» – синий. Блеск стеклянный, с перламутровым отливом на гранях. Известны кристаллы с эффектом «кошачьего глаза». Очень характерна явная анизотропия твердости этих пластин: поперек 6, вдоль – 4,5, на гранях (010) и (100) – 7. Отсюда происходит второе название – дистен, т. е. двояктвердый. Реже дистен образует в сланцах игольчатые кристаллы серого цвета (от включений графита) и шаровидные массы радиально-лучистого строения. Хрупкий. Спайность совершенная по (100) и менее совершенная по (101), по (001) наблюдается отдельность. Узнается по форме кристаллов, неодинаковой твердости. Находится в основном в слюдяных сланцах. Встречаются и прозрачные красивые образцы, пригодные для огранки, т. е. для использования в качестве ювелирных украшений

Крупные кристаллы дистена достигают 20–30 см в длину. Известны залежи сплошных дистеновых пород в Северной Индии (Лапса-Буру), в Северной Каролине (США), на Южном Урале известны сравнительно бедные месторождения, например, Борисовское (Кочкарский р-н). Накапливается в россыпях, т. к. плотность 3,6–3,7 г/см<sup>3</sup>.

**Андалузит** встречается в брусковидных розовых, зеленых, серых кристаллах. Андалузит назван от провинции Андалузия в Испании. Ромбический. Блеск стеклянный. Твердость 7–7,5. Плотность 3,1–3,2 г/см<sup>3</sup>.

Для кристаллов характерны почти прямоугольные призматические формы с призматической спайностью. По высокой твердости отличается от многих других силикатов, похожих на него по цвету.

Наиболее значительным является месторождение Семиз-Бугу в Казахстане (андалузит во вторичных кварцитах). Центральные части месторождения сложены корундовыми и мусковит-корундовыми породами, постепенно переходящими к периферии в андалузитовые породы с рутилом, мусковитом, диаспором, пирофиллитом, иногда топазом (с содержанием андалузита до 85 %). Эти породы переходят в андалузитсодержащие кварциты.

Существует интересная разновидность андалузита – хиастолит, которая представляет минералогический и коллекционный интерес. Окраска его серая, красновато-бурая. В центре кристалла образуется крест, сложенный захваченными в процессе роста кристаллом углистыми частицами. Известны месторождения андалузита в Забайкалье (Нерчинский округ), гора Хоуден (Южная Австралия). Крупнейшее месторождение андалузита известно в Калифорнии (Уайт-Маунтен). Здесь очень богатая андалузитом порода (до 85 %) залегает в виде линз и гнезд в андалузитсодержащих кварцитах.

**Силлиманит** – ромбической сингонии. Облик кристаллов игольчатый. Наблюдается в плотных лучистых массах, волокнистых агрегатах. Цвет серый, светло-бурый, бледно-зеленый. Блеск стеклянный. Твердость 7. Плотность 3,2–3,3 г/см<sup>3</sup>.

Все минералы группы кианита образуются метаморфическим путем за счет преобразования богатых глиноземом пород при повышении давления и температуры. Сначала образуются силлиманит или андалузит, а затем кианит. Поэтому иногда встречаются параморфозы кианита по андалузиту. Силлиманит образуется при самых больших температурах. Это контактово-термальнейший минерал. Большие месторождения сплошных масс силлиманита (до 85 %) в виде крупных линз и гнезд в кристаллических сланцах известны в Индии (Хази-Хиллс и Пипра).

Все три минерала – это высокоглиноземистое сырье. Используются для получения огнеупоров в металлургии и керамической промышленности.

## ЛЕКЦИЯ 10

☺ **Ставролит**  $\text{Al}_4\text{Fe}(\text{SiO}_4)_2\text{O}_2(\text{OH})_2$ . Назван по форме часто встречающихся крестообразных двойников: «ставрос» по-гречески – крест. Сингония ромбическая. Минерал метаморфических пород – кристаллических слюдяных сланцев. Встречается в них в виде

коричневых и черных хорошо ограненных призматических кристаллов и их крестообразных сростков. Твердость 7–7,5. Спайность в одном направлении ясная. Плотность 3,65–3,77 г/см<sup>3</sup>.

Ассоциирует с биотитом, кианитом (или силлиманитом), кварцем, альмандином. Образуется при процессах регионального метаморфизма глинистых пород. Встречается в россыпях, например на реке Санарке и Каменке (Качкарский р-н Южного Урала), в р-не оз. Байкал и в других районах. Практического значения не имеет.

Легко узнается по характерным формам кристаллов, особенно двойников.

☉ **Топаз**  $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F}, \text{OH})_2$ . Название происходит от острова Топазос в Красном море. Существует еще одно предположение, согласно которому название минерала произошло от санскритского «тапас» – огонь. Сингония ромбическая. Облик кристаллов. Хорошо образованные кристаллы встречаются только в пустотах. Как правило, они отличаются богатством и совершенством своих граней и иногда своими относительно большими размерами. Преимущественно распространены призматические формы кристаллов. Характерна штриховка вдоль удлинения кристаллов.

Цвет. Бесцветные, водяно-прозрачные разновидности сравнительно редки. большей частью бывают окрашены в светлые оттенки желтого, винно-желтого, соломенно-желтого, голубого, фиолетового, зеленого, розового, изредка красного цвета. Обычно кристаллы прозрачны, иногда с облачным эффектом или эффектом «кошачьего глаза»

Твердость 8. Спайность совершенная в одном направлении. Излом не по спайности раковистый. Плотность 3,49–3,56 г/см<sup>3</sup>. Блеск стеклянный, на плоскостях спайности – иногда с перламутровым отливом

В России топазы известны с 18 века: в 80-х гг. 18 в. были открыты голубые топазы Мурзинки на Урале. В Ильменских горах большинство месторождений было выработано в середине 19 в. На Волыни топазы сначала были найдены в элювиальных россыпях, и лишь в 1931 г. были обнаружены коренные месторождения в камерных пегматитах. Сейчас пегматиты единственный источник топазов Украины, да и те считаются уже отработанными (дымчатые и винно-желтые).

Важнейшее месторождение топазов в Европе Шнекенштейн (Ауэрбах), известное с 1737 г. Топазы здесь винно-желтые, бесцветные или зеленоватые. Наиболее известны топазы Бразилии: розово-коричневые и винного цвета топазы Оуро-Прету и шт. Минас-Жерайс, голубые и бесцветные топазы Диамантины. Разрабатывают месторождения в США (шт. Колорадо, Юта и др.), Бирме, Шри-Ланке, Японии, Пакистане, Австралии, на Мадагаскаре и др.

При диагностике топаза следует обращать внимание на высокую твердость, совершенную спайность, характерные формы кристаллов. От кварца отличается высокой плотностью – 3,6 против 2,6 г/см<sup>3</sup> и штриховкой вдоль удлинения, а не поперек, как у кварца, и по более сильному блеску. От берилла отличается присутствием спайности.

☉ **Титанит (сфен)**  $\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$ . «Сфен» по-гречески – клин. Назван по характерной клиновидной форме кристаллов. Синоним – титанит. Минерал широко распространен в природе. Встречается в разных горных породах как акцессорный минерал (менее 5 % объема породы). Большие скопления (до 5–50 %) образуются лишь в нефелиновых сиенитах и их пегматитах. Здесь они легко узнаются по клиновидным формам кристаллов коричневого цвета с сильным алмазным (близким к алмазному) или жирным блеском и с грубой отдельностью. Сингония моноклинная. Твердость 5–6. Плотность 3,3–3,6 г/см<sup>3</sup>. Спайность ясная или несовершенная в одном направлении.

Титанит, если содержится в значительном количестве, может быть сырьем для получения окиси титана.

☉ **Везувиан**  $\text{Ca}_{10}\text{Al}_4\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})_4$ . Впервые был встречен на Везувии, но неправильно определен. Синоним: вилуит (по названию р. Виллой в Якутии), это название было дано раньше, чем первое. Сингония тетрагональная. Характерный минерал скарнов. Узнается по тетрагонально-призматическим кристаллам и их шестоватым агрега-

там коричневого, серо-коричневого, печенково-бурого цвета. Встречается, кроме того, в бесформенных выделениях коричневого, зеленовато-желтого цвета, неотличимых на вид и по твердости от граната (андрадита и гроссуляра), если в этих массах нет кристаллов (в этом случае минералы отличаются по их оптическим свойствам под микроскопом). Твердость 6,5. Хрупкий. Спайность несовершенная. Излом неровный или раковистый. Блеск стеклянный или жирный.

Практического значения не имеет.

☺ **Группа эпидота.** В нее входят такие изоструктурные минералы как ромбический – цоизит, моноклинные: изоморфный ряд минералов клиноцоизит – эпидот и алланит (ортит) общей формулы  $R_2^{2+}R_3^{3+}(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ . Двухвалентные катионы: кальций у цоизита и эпидота, и кальций и церий (железо) у ортита. Трехвалентные катионы – это алюминий и железо.

Характер выделений. Удлиненные кристаллы, несущие на гранях штриховку. Наблюдаются агрегаты столбчатых кристаллов, а также грубо- и тонкозернистые массы.

Цоизит обладает совершенной спайностью по (100), у других минералов этой группы совершенная спайность развита по (001). Излом неровный. Минералы хрупкие. Тв. 6,5–7; у ортита 5,5–6. Плотность 3,25–3,6 г/см<sup>3</sup>, у ортита увеличивается до 4,2 г/см<sup>3</sup>. Блеск стеклянный до смолистого или полуметаллического до ортита.

Цвет цоизита серый, белый или желто-коричневый, может быть фисташково-зеленый из-за примеси трехвалентного железа, замещающего алюминий; тулита (марганецсодержащая разновидность цоизита) – розово-красный; для эпидота характерна желто-зеленая (фисташково-зеленая) и зеленовато-черная тогда как обогащенный марганцем эпидот (пьемонтит) фиолетово-красный или красно-бурый; цвет ортита коричневым до черного. Черта бесцветная или серо-бурая.

**Цоизит  $Ca_2Al_3(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$**  и минералы группы клиноцоизит – эпидот являются продуктами низкотемпературных метаморфических преобразований кальциевых плагиоклазов основных магматических пород. Агрегат этих минералов называется сосюритом. Эпидот встречается в пустотах в виде прожилков в лавах основного состава. Эта группа минералов играет большую роль в метаморфических и метасоматических породах. Эпидот распространен в кальциевых известняках, где ассоциирует с кальциевым гранатом, актинолитом, везувианом и кальцитом. Зеленые цоизитовые породы используются иногда как декоративный материал. Их добывают в США (шт. Южная Дакота, Массачусетс, Вайоминг).

Цоизит и его разновидности имеют стеклянный блеск, плотность 3,1–3,35 г/см<sup>3</sup>. Помимо цоизита в ювелирных целях иногда применяют и эпидот  $Ca_2(Al,Fe)_3(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ . Плотность 3,35–3,48 г/см<sup>3</sup>. Ювелирный эпидот встречается во многих районах мира: России, Чехии, США, Мексике, Норвегии, Японии, Австралии, Кении, Бразилии, Бирме и др.

**Ортит** от «ортос» по-гречески – прямой ( $Ca, Ce)_2(Al,Fe)_3(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ . Название связано с формами его кристаллов. Синоним алланит принят в американской литературе. Кроме того может содержать лантан и другие редкоземельные и рассеянные элементы (торий, скандий, бериллий). Облик кристаллов толстотаблитчатый, иногда шестоватый, чаще встречается в виде вкрапленных зерен в основном в кислых породах. Обладает радиоактивностью, вследствие чего может метамиктно распадаться, превращаясь в смолоподобное изотропное вещество, обогащенное водой.

☺ **Лампрофиллит  $NaSr(Ti_{1,5}Fe_{0,5})(Si_2O_7)OF_2$ .** Внешне неотличим от астрофиллита  $KNa_2Fe_5Mn_2(Si_4O_{12})_2O_4(OH,F)_3$ . Встречаются в щелочных (нефелиновых) горных породах и в щелочных пегматитах образуют одиночные удлиненно-пластинчатые кристаллы и их радиально-лучистые сростки – «солнца». Характерны бронзовый цвет, металловидный блеск и слюдоподобная спайность.

Лампрофиллит ромбической сингонии. Твердость 2–3. Хрупкий. Плотность 3,44–3,53 г/см<sup>3</sup>. По сравнению с астрофиллитом немагнитен.



Астрофиллит моноклинной или триклинной сингонии. Твердость 3–3,5. Плотность 3,28–3,3 г/см<sup>3</sup>.

## КОЛЬЦЕВЫЕ СИЛИКАТЫ (ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ)

Подкласс кольцевых силикатов объединяет сравнительно небольшую группу редких в природе минералов. Среди них только два минерала – турмалин и берилл – играют в некоторых случаях роль второстепенных, а иногда и даже главных минералов ряда минеральных месторождений.

Главными структурными элементами кольцевых силикатов являются одно- или двухъярусные тройные, четверные, шестерные, девяттерные кольца тетраэдров. Турмалин и берилл характеризуются шестерными одноярусными кольцами, но разной конфигурации. В турмалине все тетраэдры в кольце лежат своими основаниями в одной плоскости, вершины обращены в одну сторону (рисунок кольца – *з*), сечение кольца не просто шестиугольное, а дитригональное. В структуре минерала кольца ориентированы одинаково – вершинами тетраэдров вверх, структура получается резко асимметричная по строению и свойствам, кристалл турмалина имеет дитригональное сечение и неодинаковые концы. Они растут с неодинаковой скоростью, по-разному адсорбируют вещества, в том числе пигментирующие изоморфные примеси, и потому разные концы граней могут быть окрашены в разные цвета; из-за асимметрии структуры в турмалине хорошо проявлен пироэлектрический эффект.

В бериллах кольцо гексагональное с горизонтальной плоскостью симметрии (рисунок кольца – *в*). Оба конца кристалла берилла одинаковы по огранке и своим свойствам. В эвдиалитах сочетаются кольца двух типов – трехчленные ( $\text{Si}_3\text{O}_9$ ) и девяттерные ( $\text{Si}_9\text{O}_{27}$ ). Значительно более сложна структура кордиерита – в ней есть шестерные и четверные кольца, соединяющиеся друг с другом через общие тетраэдры в единый каркас.

Кольца в структуре минералов скрепляются катионами, внутри колец нередко располагаются дополнительные анионы  $(\text{OH})^-$  или молекулярная вода. В целом структуры кольцевых силикатов сложные и неплотные. Сингония минералов определяется геометрией их колец. Преобладают тригональные и гексагональные минералы. Кордиерит ромбический, псевдагексагональный минерал.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☉ **Берилл  $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$** . Сингония гексагональная. Структура образована кольцами, соединяемыми атомами бериллия (координационное число 4) и алюминия (координационное число 6). Кольца ( $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ) располагаются друг под другом, так что образуют длинные каналы, проходящие вдоль кристалла. В этих каналах могут располагаться дополнительные (как бы сверх идеальной формулы) катионы щелочных металлов и молекулы воды. В качестве примесей (до 7 %) могут быть Na, K, Li, Cs, Rb, Cr,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , Mg, Ca, Sc, Mn, Ti, V, Ga, Ge, B, P. Кольца соединяются через атомы бериллия и алюминия.

В бериллах, кроме того, алюминий может замещаться в ограниченных количествах марганцем, трехвалентным железом и хромом, а бериллий и кремний микроколичествами железа.

Кристаллы берилла часто характеризуются правильной формой. Размер их сильно варьирует. Обычно габитус кристалла призматический. При растворении иногда образуют копьевидные или «обсосанные» кристаллы. Берилл встречается также в виде параллельных, сноповидных, радиально-лучистых и шестоватых агрегатов. Каждая разновидность берилла характеризуется своими значениями плотности и оптическими характеристиками. Спайности нет, наблюдается отдельность по пинакоиду. Излом неровный, раковистый. Твердость 7,5–8. Твердость граней пинакоида несколько ниже. Устойчив в кислотах. Очень медленно растворяется в расплаве щелочей при 1420° С. При нагревании свыше 1000° С берилл обесцвечивается, мутнеет и растрескивается.

Берилл наиболее распространенный минерал бериллия. Он встречается в пегматитах, грейзенах, гидротермальных образованиях, в россыпях

Месторождения ювелирных бериллов известны в Бразилии, Мозамбике, ЮАР, Мадагаскаре, Намибии, США, Шри-Ланке. Известны месторождения ювелирного берилла на Урале и в Забайкалье, но они уже отработаны.

Берилл, окрашенный в зеленый цвет хромом, называется изумрудом. Зеленая окраска изумруда обусловлена трехвалентным хромом, изоморфно замещающим ионы алюминия в октаэдрических позициях структуры берилла. Интенсивность окраски связана с содержанием этой примеси хрома.

В течение многих столетий разрабатывались месторождения изумрудов в Колумбии. Изумруды Колумбии дают от 55 до 90 % мировой добычи. Около 60 % изумрудов, добываемых в Колумбии, торгового качества, 25 % – среднего, остальные – высокого качества.

Значительны по масштабам месторождения Бразилии, которые в настоящее время дают около четверти мировой добычи изумрудов. Они находятся в штатах Баия (Карнаиба и др.), Минас-Жерайс и Гояс. Первые находки изумрудов в Европе относятся к 1797 г., когда были найдены кристаллы в Австрии – в Зальцбурге (Восточные Альпы). Изучение и разработка месторождения Хабахталь проводилась с 1860 по 1914 г.

## ЛЕКЦИЯ 11

**Аквамарин** – голубой или зеленовато-голубой прозрачный берилл, цвет которого можно сравнить с цветом воды тропического моря (от латинского «акве» – вода, «маре» – море). Окраска изменяется от небесно-голубой до темно-синей.

Синие оттенки свойственны кристаллам Забайкалья и Урала, зелено-синие – аквамарины Ильменских гор. Известны находки аквамаринов в пегматитах Волыни.

Около половины мировой добычи аквамаринов дает Бразилия (шт. Минас-Жерайс, Баия, Эспириту-Санту, Риу-Гранди-ду-Норти). Известны аквамарины в Мадагаскаре, Нигерии, Зимбабве и в ряде штатов США.

Окрашены аквамарины обычно равномерно, однако встречаются зонально окрашенные кристаллы. Окраска аквамаринов обусловлена изоморфным вхождением в структуру бериллов ионов двух- и трехвалентного железа.

☉ **Кордиерит**  $(Mg, Fe)_2Al_3(AlSi_5O_{18}) \cdot nH_2O$ . Синоним иолит («иол» по-гречески – фиалка), дихроит («дихрос» по-гречески – двуцветный, имеется в виду его дихроизм) впервые был открыт акад. Н. И. Кокшаровым в 1856 г. на Урале. Ромбической сингонии. Трудно диагностируемый минерал, встречается в виде округлых мельчайших (размером в несколько мм) зерен в метаморфических породах – сланцах, гнейсах. Характерен чернильно-синий цвет и полупрозрачность.

Твердость 7–7,5. По цвету легко узнается в крупных кристаллах.

Именно в кордиерите ученый Кордье обнаружил такое свойство минералов как плеохроизм.

☉ **Группа турмалина**. Она объединяет несколько минеральных видов общей формулы  $X_1Y_3Z_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_4$ , где X = Ca, Na; Y = Mg, Li, Al,  $Fe^{2+}$ , Mn; Z = Al,  $Fe^{3+}$ , Cr. Наиболее распространены шерл и рубеллит (эльбаит).

Главные элементы структуры турмалинов – это шестерные кольца кремнекислородных тетраэдров и анионные группировки  $(BO_3)_3$ , типичные для самостоятельных минералов бора; в этом отношении турмалин можно назвать боратосиликатом в классе островных силикатов. Сингония тригональная. Кристаллы дитригонально-призматические, шестоватые с грубой штриховкой вдоль удлинения, с характерным поперечным сечением в виде сферического треугольника. По концам они огранены с одной стороны гранями пирамид, с другой – гранью моноэдра и пирамид. Часты радиально-лучистые агрегаты («турмалиновые солнца»). Цвет черный (за счет железа) у шерла, розовый (за счет изо-

морфных примесей марганца) у рубеллита, синий и голубой (у индиголита), зеленый (верделит), красный (сибирит), коричневый, желтый, бурый (дравит), белый, бесцветный (ахроит) у других по составу турмалинов. Химический состав определяет окраску турмалина и другие физические свойства.

Очень характерны многоцветные (полихромные) кристаллы и кристаллы с зональным распределением окраски. Блеск сильный стеклянный на гранях, жирный в изломе. Твердость 7,5. Спайности нет. Хрупок, характерны поперечные трещины, нередко залеченные кварцем. Плотность 3,02–3,33 г/см<sup>3</sup>.

Турмалины встречаются в гранитах, гранитных пегматитах, грейзенах, высокотемпературных гидротермальных касситерито-кварцевых жилах, в сланцах и гнейсах. Везде обычен железистый турмалин, но в гранитных пегматитах сподуменового типа и грейзенах встречается розовый литиевый турмалин и многоцветные (полихромные) кристаллы. Из цветных турмалинов наиболее распространены розовые и зеленые.

Легко узнается по форме кристаллов, их поперечному разрезу (дитригоны и сферические треугольники), твердости, отсутствию черты.

☉ **Эвдиалит.** Сложный кольцевой силикат циркония, железа, марганца с тройными и девятерными кольцами. Сингония тригональная. Кристаллы толстотаблитчатые, чаще изометричные зерна, вкрапленные в другие минералы. Цвет малиново-красный (за счет марганца), коричневый (при преобладании железа). Блеск стеклянный, жирный. Твердость 5,5.

Образуется в нефелиновых сиенитах и их пегматитах. При больших скоплениях является рудой (пока потенциальной) на цирконий.

Легко узнается по малиновому цвету, ассоциации с нефелином, минералами группы ринколита. От альмандина отличается меньшей твердостью и тем, что ассоциирует не с кварцем, как альмандин, а с нефелином.

## ЦЕПОЧЕЧНЫЕ И ЛЕНТОЧНЫЕ СИЛИКАТЫ

К подклассам цепочечных и ленточных силикатов относятся в первую очередь главные породообразующие минералы – пироксены (диопсид, геденбергит, эгирин и пр.) и амфиболы (актинолит, роговая обманка и др.), а также ряд менее распространенных минералов. Пироксены и амфиболы во многом между собой похожи, но есть также и различия, обусловленные различиями в структурах и составах. Пироксены и амфиболы будем рассматривать в сравнении, а родонит и волластонит рассмотрим отдельно, т. к. они имеют «аналогов» среди ленточных силикатов.

## ВОЛЛАСТОНИТ И РОДОНИТ

Каждый из этих минералов характеризуется своим типом цепочки, отличной от пироксеновой. У волластонитовой цепочки период повторяемости равен 3 и формула анионного радикала  $(\text{Si}_3\text{O}_9)^{6-}$ , а у родонита  $(\text{Si}_5\text{O}_{15})^{10-}$ . Цепочки компонуются в структуре минералов параллельно друг другу и соединяются атомами двухвалентных элементов – Ca, Mn.

**Волластонит  $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$**  встречается в виде белых уплощенных и игольчатых кристаллов и их радиально-лучистых сростков в мраморах и скарнах. Блеск стеклянный иногда шелковистый. Твердость 5–5,5.

Волластонитовые мраморы используются при изготовлении высокосортных цементов.

**Родонит  $\text{Mn}_4(\text{Si}_5\text{O}_{15})$ , бустамит  $\text{CaMn}_4(\text{Si}_5\text{O}_{15})$**  встречается в тонкозернистых сплошных массах красивого розового цвета с черными потеками пиролюзита  $\text{MnO}_2$  в трещинах этих масс. Триклинный. Твердость 5,5–6,5. Плотность 3,4–3,7 г/см<sup>3</sup>. Спайность совершенная в направлении (110) и менее совершенная по (001). Излом неровный, раковистый. По степени прозрачности родонит варьирует от прозрачных в тонких сколах до непрозрачных.

Образуется при метаморфизме осадочных месторождений марганца и в скарнах. Как главный компонент входит в ценный поделочный камень, называемый орлецом, – это смесь родонита, других силикатов и карбонатов марганца и пиролюзита в виде дендритов.

Коренное месторождения родонита было открыто на Урале в конце 18 в. в 25 км от г. Екатеринбурга около д. Сидельниково. В середине 19 в. родонит широко применялся в русском камнерезном искусстве.

В России наиболее известно Мало-Сидельниковское месторождение около Екатеринбурга. Известен низкокачественный родонит в Средней Азии.

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПИРОКСЕНОВ И АМФИБОЛОВ

Пироксены и амфиболы имеют сходный, довольно простой химический состав. Чаще всего это силикаты магния либо двойные соли магния и кальция, во многих минералах кроме этого присутствует натрий. В качестве постоянной изоморфной примеси в позициях магния размещается железо, иногда полностью вытесняя магний. В некоторых случаях, обычно в ассоциации с натрием в состав пироксенов и амфиболов входит алюминий, занимая или позиции магния, или внедряясь в радикал в позиции кремния. Наконец, есть редкие литиевые пироксены и амфиболы.

Главным различием состава пироксенов и амфиболов является присутствие конституционной воды в виде анионной группы  $(\text{OH})^-$ .

В структуре пироксенов имеются одинарные цепочки  $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$ , в амфиболах – ленты  $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$  с группами  $(\text{OH})^-$  в центре каждого кольца этой ленты. Цепочки и ленты ориентированы параллельно друг другу вдоль вытянутости кристаллов и группируются парно. В каждой паре они соединяются через вершины тетраэдров катионами  $\text{Mg}^{2+}$ , каждая пара соединяется с соседней ионами  $\text{Ca}^{2+}$ . При разных сдвигах относительно друг друга цепочек и лент получают ромбические и моноклинные пироксены и амфиболы. Между парами лент в амфиболах существуют полости. Это вакантная позиция для натрия. Здесь он помещается в структуре так называемых щелочных амфиболов.

Наиболее просты формулы следующих минералов:

Пироксены	Амфиболы
Энстатит (ромб.) $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$	Антофиллит (ромб.) $\text{Mg}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Клиноэнстатит (мон.) $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$	Куммингтонит (мон.) $\text{Mg}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Диопсид (мон.) $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	Тремолит (мон.) $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$

Зная эти формулы наизусть, можно вывести из них все гипотетические и реальные формулы амфиболов и пироксенов. Состав реальных минералов этих групп всегда гораздо более сложен за счет явлений изоморфизма. Особняком стоят только литиевые минералы – их состав наиболее близок к формулам химически чистых веществ

*Литиевые пироксены и амфиболы:*

Сподумен  $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$   
Холкмвистит (ромб. Amf) –  $\text{Li}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$

Так, используя простую схему изовалентного замещения  $\text{Mg}^{2+} \leftarrow \text{Fe}^{2+}$ , получаем формулы моноклинных пироксенов: ферросилита,  $\text{Fe}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$  и геденбергита  $\text{FeCa}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ , моноклинных амфиболов: грюнерита  $\text{Fe}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$  и ферроактинолита  $\text{Ca}_2\text{Fe}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ .

Кроме перечисленных используют еще и такие наиболее распространенные и устойчивые названия пироксенов:

<i>Натриевые пироксены</i>	<i>Натриевые амфиболы</i>
Жадцит $\text{NaAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	Глаукофан $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Омфацил $\text{NaAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	Рибекит $\text{Na}_2\text{Fe}_3\text{Fe}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Эгирин $\text{NaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	<i>Кальциевые амфиболы</i>
<i>Кальциевые пироксены</i>	Тремолит (мон.) $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Геденбергит $\text{FeCa}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	

**Диопсид (мон.)  $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$     **Актинолит  $\text{Ca}_2\text{Fe}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ .****

Традиционно используют объединенные групповые названия – авгиты, роговые обманки, щелочные амфиболы.

**Авгиты** – это диопсиды-геденбергиты с изоморфной примесью эгирина и гипотетических алюминиевых компонентов типа  $\text{CaAl}(\text{AlSiO}_6)$ ,  $\text{CaTi}(\text{Al}_2\text{O}_6)$ .

**Роговые обманки** – объединенное название сильножелезистых амфиболов с умеренным количеством натрия (или без него) и с алюминием в позиции кремния. К ним относятся минералы типа **чермакита  $(\text{Ca}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2)$** , **эденита  $(\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2)$** , **гастингита** и др. Щелочные амфиболы – объединенное название для амфиболов с двумя-тремя атомами натрия в их формуле, без алюминия в составе радикала, но с большим количеством алюминия (и железа) в позициях магния. Это глаукофан, рибекит, магнезиорибекит, арфведсонит и др.

### **МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИРОКСЕНОВ И АМФИБОЛОВ**

Морфологически кристаллы пироксена и амфибола подобны друг другу. Они вытянуты соответственно вдоль цепочек и лент. У амфиболов кристаллы более шестоватые и уплощенные. В идеале на кристаллах развиты одни и те же простые формы: ромбическая призма (m) и три пинакоида (a, b, c). У ромбических минералов верхний пинакоид горизонтален, а у моноклинных наклонен и симметричность кристаллов снижается. Угол между гранями призмы у пироксенов около  $90^\circ$ , у амфиболов – около  $120^\circ$ .

Для кальциевых и магниевых пироксенов (диопсид, энстатит и др.) характерны зернистые агрегаты и агрегаты короткопризматических кристаллов.

Железистые пироксены (эгирина, геденбергит) образуют шестоватые, игольчатые кристаллы, радиально-лучистые агрегаты.

Для всех амфиболов характерны именно такие выделения – шестоватые, игольчатые кристаллы, их беспорядочные скопления, звездчатые, веерообразные сростки. Само название актинолит связано с игольчато-лучистой формой агрегатов (в переводе с греч. – «лучистый камень»).

Физические свойства пироксенов и амфиболов очень сходны. Твердость 5,5–6 (у сподумена – 7). Спайность у пироксенов плохо заметна (у сподумена совершенная, у амфиболов отчетливо проявлена, совершенная). Цвет минералов обычно определяется содержанием в них железа и меняется от белого (сподумен, антофиллит, тремолит) через зеленый (диопсид, актинолит, эгирина) до зелено-черного (геденбергит, роговые обманки, щелочные амфиболы). Как исключение у редких хромсодержащих разновидностей он яркий изумрудно-зеленый (таков, например, цвет хромдиопсида). Иногда у сподумена с примесью марганца цвет розоватый, очень светлый. Среди щелочных амфиболов есть минералы сине-голубого цвета (рибекит, крокидолит).

Блеск у амфиболов и пироксенов стеклянный, но у амфиболов он значительно сильнее, особенно у богатых железом роговых обманок и щелочных амфиболов. Ромбические пироксены выделяются по блеску – он у них имеет металловидный (бронзит) или перламутровый отлив.

Спайность у тех и у других по призме, но у пироксенов она под углом около  $90^\circ$ , у амфиболов – около  $120^\circ$ . У пироксенов она хуже и практически мало заметна (за исключением сподумена), у амфиболов проявлена хорошо, четко заметны сколы под углами  $120^\circ$  и  $60^\circ$ .

### **ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРОКСЕНОВ И АМФИБОЛОВ**

Пироксены и амфиболы встречаются в сходных типах минеральных месторождений – чаще всего это магматические горные породы, скарны, гнейсы и кристаллические сланцы. Во всех случаях, когда оба минерала встречаются совместно, пироксены являются высокотемпературными и образуются при большем давлении, чем амфиболы. Пироксены

чаще кристаллизуются в магматических условиях, а амфиболы (но не всегда) – в гидротермальных; первые – более глубинные минералы, вторые – минералы средних глубин. Очень типично замещение пироксенов амфиболами в результате понижения температуры, давления и возрастания химической активности воды в среде минералообразования.

Морфологические свойства пироксенов и амфиболов зависят от условий их образования. Есть пироксены и амфиболы, которые образуются в магматических условиях, другие могут образоваться в магматических и метаморфических, а третьи – только в метаморфических.

В ультраосновных и основных магматических (глубинных) породах пироксены представлены железо-магниевыми силикатами ромбической и моноклинной сингоний. Это энстатит (и его более железистые разновидности – гиперстен, бронзит) и диопсид-геденбергит (с изоморфной примесью того или иного количества натриевого и алюминиевого компонента). Типичным минералом мантийных ультраосновных горных пород (эклогитов) является омфациит – это диопсид, обогащенный изоморфной примесью жадеита (натриевого клинопироксена).

В средних и кислых глубинных породах встречаются диопсид (с изоморфной примесью геденбергита и эгирина) и обыкновенная роговая обманка.

В щелочных глубинных породах (сиенитах, нефелиновых сиенитах) пироксены представлены своими щелочными разновидностями – эгирин-диопсидом, эгирин-авгитом и эгирином, амфиболы здесь также щелочные – арфведсонит, рибекит и др. Эти же щелочные пироксены и амфиболы образуются и в окружающих щелочные массивы песчаниках, гнейсах и других породах в ходе их приконтактных изменений.

В эффузивных породах типа базальтов пироксены вкрапленников чаще всего представлены диопсид-геденбергитом с примесью натрия, алюминия, титана (авгиты и титанавгиты), амфиболы – роговой обманкой (бурой базальтической). Здесь роговая обманка часто бывает обогащена титаном – такие роговые обманки называются керсутитами.

В гранитных пегматитах с щелочным уклоном (натриево-литиевый тип) постоянно в качестве главного минерала присутствует сподумен, а в окружающих их гнейсах за счет выноса лития растворами из пегматитов образуется холмквестит (литиевый амфибол). В гранитных пегматитах других типов пироксены и амфиболы крайне редки.

В щелочных пегматитах встречается эгирин, арфведсонит и другие щелочные амфиболы. Они играют здесь роль постоянных второстепенных минералов.

В скарнах пироксены (диопсид, геденбергит) являются обязательными главными минералами. Они образуются в самую раннюю стадию формирования скарнов, а в поздние стадии процесса интенсивно замещаются роговой обманкой, актинолитом и тремолитом. Очень характерны в некоторых скарнах крупные светло-зеленые кристаллы слабозеленого диопсида с хорошо развитой отдельностью, обусловленной тончайшими вростками магнетита, – такой диопсид называют диаллагом. Из амфиболов типичны актинолит и роговая обманка.

В процессах регионального метаморфизма осадочных, вулканогенно-осадочных, магматических горных пород пироксены образуются роговые обманки, тремолит-актинолиты, диопсиды и геденбергиты. Продуктами сильного метаморфизма богатых натрием пород являются щелочные пироксены и амфиболы. Чаще всего это жадеит и глаукофан.

Образуясь при высоких давлениях амфиболы и пироксены легко изменяются при понижении температуры и давления при воздействии гидротермальных растворов; замещаются при этом слюдами, хлоритом, иногда серпентином и тальком (магнезиальный пироксен – энстатит). При поверхностном выветривании по ним развиваются глинистые минералы и гидроксиды железа.

Практическое значение из месторождений пироксенов и амфиболов имеют некоторые метаморфические породы как источник добычи жада и измененные, сильно метаморфизованные ультраосновные породы для добычи нефрита.

**Сподумен  $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ .** Занимает несколько особое положение среди группы пироксенов. Не образует с другими пироксенами изоморфных смесей. Содержит окиси лития до 8 %. Цвет серовато-белый, нередко с зеленоватым оттенком, желтовато-зеленый, фиолетовый (кунцит). Блеск стеклянный, на плоскостях спайности со слабым перламутровым отливом. Тв. 6,5–7.

Встречается в гранитных пегматитах в ассоциации с кварцем, полевыми шпатами, литиевыми слюдами, турмалином и др.

Из довольно многочисленных месторождений сподумена можно отметить наиболее известное крупное месторождение Кийстон в США (шт. Южная Дакота), где встречаются гигантские кристаллы измененного сподумена до 12–16 м в длину и около 1 м в поперечнике (весом до 90 т). Пегматитовые месторождения Мадагаскара интересны тем, что там встречаются неизменные прозрачные разности различной окраски: желтовато-зеленой, желтой, розовой.

Сподумен вместе с литиевыми слюдами служит источником для получения препаратов лития, употребляемых в медицине, пиротехнике, фотографии, стеклоделии, рентгенографии и др. Прозрачные красиво окрашенные сподумены (голубовато-зеленый и светло-зеленый – гидденит и сиренево-розовый – кунцит) используются как ювелирные камни.

## ЛЕКЦИЯ 12

**Жад (жадеит)** представляет собой плотный спутанно-волоконистый агрегат жадеита.

В зависимости от состава жадеита (от входящих в него примесей), выделяют собственно жадеиты (от 80–99 жадеита), диопсид-жадеиты (50–80 жадеита), омфациты (20–50 жадеита) и другие разновидности, например, хлормеланиты (с эгирином), жадеитовые хлормеланиты и др.

Хорошо образованные кристаллы жадеита встречаются чрезвычайно редко. В литературе описывается находка таких кристаллов в глаукофановой породе в США, в шт. Калифорния близ г. Кloverдейла. Обычно он наблюдается в виде тонко-, средне- до крупнозернистых агрегатов. Плотные, вязкие породы, сложенные таким агрегатом называются жадеитами.

Прозрачность жадеита может быть различной: от полупрозрачного (наиболее тонкозернистого) и просвечивающего в тонких сколах до наиболее часто встречающегося – непрозрачного. Цвет белый, серый, серовато-зеленый, зеленый различных оттенков (окраска связана с примесью ионов двух- и трехвалентного железа, реже хрома), голубой, синий, черный (хлормеланит). При выветривании в поверхностных условиях жадеит может приобретать желтый, оранжевый, бурый, красный, розовый, розовато-фиолетовый (лавандовый), фиолетовый, коричневый цвет. Блеск стеклянный, матовый, иногда с перламутровым отливом. Твердость 6–7. спайность ясная по (110), иногда наблюдается отдельность. Плотность 3,25–3,50 г/см<sup>3</sup>. в ультрафиолетовых лучах жадеит иногда люминесцирует белым, слабым зеленым, серо-голубым светом.

Месторождения жадеита связаны с интрузивными кислыми, средними и основными породами, россыпями. Наиболее известные месторождения Итмурундинское в Северном Прибалхашье, Лево-Кечпельское на Полярном Урале и Кашкаракское (в Западном Саяне). Однако основным районом добычи жадеита считаются северные округа Бирмы, где он добывается не одну тысячу лет (в год несколько десятков тысяч кг).

**Нефрит** – это плотная скрытокристаллическая (спутанно-волоконистая) разновидность амфибола ряда актинолит – тремолит. Тремолит (по месту первой находки в долине Тремоль, к югу от перевала Сен-Готтард, Швейцария).

Нефрит-тремолит – белый или светлоокрашенный; плотность 2,9–3 г/см<sup>3</sup>. Плотность нефрита-актинолита выше 3,1–3,3 г/см<sup>3</sup>. Окрашен в зеленые цвета двухвалентным железом.

Твердость нефрита 5,5–6,5. Однако нефрит очень вязкий. Раздробить валун нефрита практически невозможно. Ферсман назвал нефрит национальным камнем Китая.

Коренные месторождения нефрита относятся к пневматолито-гидротермальному классу, а по составу вмещающих пород бывают двух типов: а) в альпинотипных гипербазитах и б) в доломитовых мраморах. Имеются также россыпи.

Наиболее известное месторождение нефрита находится в Китае в западных отрогах хр. Куэнь-Лунь около Кашгара и Хотана, а также в россыпях по берегам всех местных рек, сбегаящих с хребта.

Крупнейшие в мире месторождения нефрита были открыты в 1969 г. в Канаде – в пров. Британская Колумбия. Ранее там были известны россыпи. За 20 лет к середине 70-х гг. там было добыто 550 т нефрита. Крупные месторождения расположены в Австралии, Новой Зеландии, США и др.

Коренная залежь нефрита в Восточном Саяне была открыта в 1896 г., а месторождение в 1937 г. Открыты Оспинское, Зуноспинское, Уланходинское и др. месторождения.

**Диопсид  $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$  – геденбергит  $\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$**  образует изоморфный ряд. Название произошло от греч. двойное обличье, а геденбергит от Людовика Геденберга, который впервые описал его.

Цвет диопсида серый, иногда бесцветен, с увеличением содержания двухвалентного железа становится бутылочно-зеленым.

Твердость диопсида 5,5–6,6. Плотность 3,22–3,28 г/см<sup>3</sup>. Блеск стеклянный. Уникальным является Ингалинское месторождение России (Алдан). Хромдиопсиды известны в Финляндии (Оутокумпу) и ЮАР. Виоланы – в Италии, желтые и зеленые с эффектом кошачьего глаза – в Бирме, бутылочно-зеленые и красно-коричневые – в Канаде, желтые – в Австралии и США, желтые и уникальные черные с астеризмом – в Индии.

## СЛОИСТЫЕ (ЛИСТОВЫЕ) СИЛИКАТЫ И АЛЮМОСИЛИКАТЫ

К подклассу слоистых (листовых) силикатов и алюмосиликатов относятся хорошо известные всем вещества – тальк, слюды, глинистые минералы, хлориты, серпентины и др. Многие из них являются порообразующими минералами. Так, слюды – непременный компонент гранитов и их пегматитов, многих сланцев и гнейсов, грейзенов. Глинистые минералы являются основной частью кор выветривания магматических пород и входят в осадочные горные породы (глины, мергели и др.). Многие минералы этого подкласса широко используются в промышленности (слюды-диэлектрики – мусковит и флогопит), серпентиновый огнеупорный асбест, природный смазочный минерал тальк и др. и строительстве (строительные материалы и адсорбенты). Глинистые минералы никеля добываются как руда на этот металл.

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Различают листовые силикаты (алюмосиликаты) с простыми и сложными сетками тетраэдров. Последние менее распространены.

**Слоистые силикаты с простыми сетками тетраэдров.** Остовом их структуры являются сетки кремнекислородных тетраэдров. Они располагаются параллельно друг другу и чередуются с плоскими сетками другого состава, образуя пакеты слоев. Установлено два типа пакетов: а) двухслойный 1:1 несимметричный; б) трехслойный 2:1 симметричный.

Несимметричный пакет типа 1:1 состоит из одной сетки (слоя, листа) тетраэдров с общей формулой сетки  $(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})^-$  и одной сетки октаэдров, заполненных атомами магния или алюминия. Если вести расчет формулы по одному кольцу тетраэдров  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ , получим формулу серпентина  $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ . Каждый пакет имеет нулевой суммарный заряд, он скреплен с соседними (верхними и нижними) пакетами слабо, лишь остаточными (вандерваальсовыми) связями. Пакеты несколько смещены (сдвинуты) относительно друг друга. В каждом пакете Mg и Al занимают октаэдрические позиции, располагаясь между атомами  $\text{O}^{2-}$  и  $(\text{OH})^-$ . В серпентине три таких октаэдра, заполненных катионами (маг-

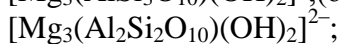
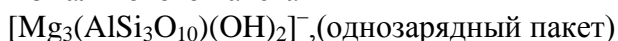


нием), в каолините их два, заполненных алюминием. Очень часто отмечают, что серпентин – триоктаэдрический слоистый силикат, а каолинит – диоктаэдрический. Эти термины широко используются.

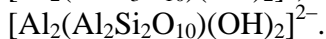
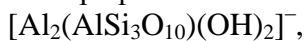
В симметричном трехслойном пакете типа 2:1 имеется два слоя тетраэдров, обращенных друг к другу вершинами, между ними в октаэдрических пустотах располагается магний или алюминий. Так трактуются структуры талька и пиррофиллита. Суммарный заряд пакетов равен нулю. Соседние пакеты скреплены остаточными связями. Тальк – триоктаэдрический силикат, пиррофиллит – диоктаэдрический.

В слоистых алюмосиликатах с простыми сетками установлен один тип пакетов – симметричный трехслойный (2:1). В нем чередуются (подобно тальку и серпентину) слой тетраэдров  $(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})^-$ , слой октаэдров с магнием или алюминием, слой тетраэдров  $(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})^-$ . Но в каждом пакете часть тетраэдров (не более половины) занята алюминием. За счет замены  $\text{Si}^{4+}$  на  $\text{Al}^{3+}$  пакет приобретает заряд. В результате получаем следующие формулы пакетов и их заряды:

Из талькового пакета –



из пиррофиллитового пакета –



За счет избыточного заряда пакетов между ними в структуру входит слой катионов-компенсаторов. Это могут быть  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , комплексный катион  $\text{OH}$ . В первом случае получается структура слюд, во втором – структура хрупких слюд, в третьем – структура хлоритов. Рассмотрим структуры слюд и хлоритов. Т. к. хрупкие слюды очень редки, то их рассматривать не будем.

В слюдах роль иона-компенсатора играет  $\text{K}^+$  (натриевые слюды редки).

Сравнение структур диоктаэдрических и триоктаэдрических слоистых силикатов дают пары минералов: серпентин – каолинит, тальк – пиррофиллит, флогопит – мусковит, первые являются триоктаэдрическими, вторые – диоктаэдрическими.

Все слоистые силикаты и алюмосиликаты имеют свои структурные разновидности за счет разного смещения (сдвига) и разворота пакетов друг относительно друга, что легко происходит из-за слабых связей между пакетами. В итоге получаются минералы разных сингоний – моноклинной (чаще всего), гексагональной, ромбической, тригональной, триклинной. Такие структурные разновидности слоистых силикатов называют **политипами**. Некоторые из них устойчивы только при определенных давлениях и температурах и образуются только в определенной химической обстановке. Политипия – это частный случай полиморфизма.

Кроме рассмотренных минералов есть и более редкие слоистые силикаты. Например, в природе встречаются минералы с волнообразно изгибающимися и завернутыми по спирали слоями (некоторые серпентины и др.) Совершенно особыми по структуре являются так называемые смешанослойные силикаты: они сложены чередующимися пакетами монтмориллонита и талька, монтмориллонита и слюды, хлорита и слюды и т. п.

**Слоистые силикаты со сложными сетками тетраэдров.** Существует достаточно много редких минералов специфического состава со сложными сетками тетраэдров. Строение таких сеток разное. Наиболее просты структуры сепиолита и палыгорскита. В них в тетраэдрических сетках тетраэдры периодически развернуты вершинами то «вверх», то «вниз».

Структура **чаронита** более сложна и является промежуточной между слоистой и ленточной. В датолите половина тетраэдров занята не кремнием, а бором, они развернуты в разные стороны.

## МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ СИЛИКАТОВ (АЛЮМОСИЛИКАТОВ) С ПРОСТЫМИ СЕТКАМИ ТЕТРАЭДРОВ

Крупные хорошо ограненные кристаллы слоистых силикатов и алюмосиликатов очень редки, т. к. у них некомпактная кристаллическая структура и слабые связи между пакетами. Явно распознаваемые кристаллы встречаются у флогопита, биотита, мусковита, хрупких слюд, хлоритов, из них крупные (и даже гигантские) бывают только у мусковита и флогопита (биотита). Они имеют псевдогексагональную симметрию и пластинчатый облик. Реже встречаются бочонковидные кристаллы этих минералов. Истинная сингония в большинстве случаев моноклинная, а их реальные очертания далеки от совершенных.

Цвет зависит от наличия в минерале элементов-хромофоров (железа, хрома, марганца), без хромофоров цвет белый. Таковы химически чистые каолинит, серпентин, тальк, пирофиллит, монтмориллонит, флогопит. В присутствии двухвалентного железа минералы приобретают зеленую окраску разной интенсивности (тальк, серпентин, флогопит, хлорит), небольшая примесь трехвалентного железа придает мусковиту чуть коричневатую окраску. Наличие в минерале одновременно двух- и трехвалентного железа придает буро-коричневую, зелено-черную, черную (как у железистых флогопита, биотита, лепидомелана) окраску. Очень своеобразна роль трехвалентного железа как хромофора, когда он занимает в флогопите позицию алюминия в слоях тетраэдров: минерал становится ярким рыже-коричневым (тетраферрифлогопит, т. е. флогопит с железом в четверной координации)

Примесь хрома изменяет цвет в зависимости от структуры минерала. В мусковите появляется яркая зеленая окраска (фуксит). Хлориты приобретают яркий розово-фиолетовый цвет. Марганец, входя в состав литиевых слюд, вызывает их розово-лиловую окраску.

Блеск разный. На гранях кристаллов из-за их несовершенства он матовый или жирный, на плоскостях спайности – стеклянный, у слюд – с перламутровым отливом. В агрегатах блеск жирный, матовый.

Все слоистые силикаты и алюмосиликаты обладают весьма совершенной спайностью по пинакоиду (т. е. в одном направлении – параллельном пакетам). Спайные пластинки у слюд (мусковита, флогопита, биотита) упругие; отогнутые по спайности они притягиваются назад из-за связей, возбуждаемых в них межпакетными катионами калия. У талька, пирофиллита, в которых межпакетных ионов нет, спайные пластинки крошатся, ломаются, но назад не пригибаются.

Твердость минералов низкая и определяется непрочностью их кристаллических структур. У силикатов (т. е. у минералов без межпакетных ионов) твердость 1–2, из них наиболее мягкие магниевые силикаты, что легко находит объяснение в большом размере и меньшем заряде магния по сравнению с алюминием (так, тальк жирен на ощупь, а пирофиллит – нет). У слюд за счет межпакетного катиона  $K^+$  твердость составляет 2–3, а у хрупких слюд за счет более сильного межпакетного катиона  $Ca^{2+}$  или  $Mg^{2+}$  твердость повышается до 4.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☺ **Группа серпентина.** В эту группу входят полиморфы – слоистые силикаты магния состава  $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$ . Нередко используется удвоенная химическая формула  $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ . «Серпентария» по-латыни – змеевидный из-за сходства окраски особенно полированных образцов с кожей змеи. Отсюда русское название змеевик, относящееся к горной породе из серпентина. Раньше употреблялось название офит (с греч. – змея), теперь это название (или серпофит) сохранилось за опаловидной гелеподобной, богатой водой разновидностью серпентина, с восковым блеском и однородной окраской (бледно-зеленой, желтовато-белой, реже буровато-зеленой). Эта же разновидность называлась благородным змеевиком. Всегда проявлен изоморфизм  $Mg^{2+} \leftarrow Fe^{2+}$ , но умеренно. Полиморфы имеют разные названия: лизардит, антигорит, хризотил и др. Лизардит имеет идеальную

слоистую структуру. В антигорите слои построены из групп тетраэдров, развернутых то вверх, то вниз от плоскости слоя, в хризотиле слои свернуты в трубку. Эти минералы встречаются в скрытокристаллических аморфных на вид, клееподобных массах белого, желтого, зеленого цвета или пестрой окраски. В них в жилках перекристаллизации нередко образуются волокнистые, асбестовидные агрегаты хризотила. Такие волоконца состоят из свернутых в трубку однослойных пакетов серпентина. Распространен в плотных массах, часто смятых, со следами скольжения, иногда с прожилками асбеста. Цвета зеленые, темно-зеленые, зеленовато-черные, офит желто-зеленого, антигорит сероватого с голубоватым оттенком. Блеск стеклянный, жирный, у офита восковой. Антигоритовые серпентиниты обладают вязкостью и более высокой твердостью.

Самостоятельный изоморфный ряд образуют никелевые серпентины с частичным замещением магния никелем. Максимально установленное его содержание (NiO) в минерале составляет 16 %. Никелевые серпентины встречаются в коре выветривания ультраосновных пород в виде тонкодисперсных смесей с другими слоистыми силикатами. Некоторые из таких смесей получили названия: непуит, ревдинскит, гарниерит.

Твердость 2,5–3, антигорита 3,5, офита 2. Плотность 2,5–2,7 г/см<sup>3</sup>.

Используется как поделочный камень. Как огнеупорное сырье. Хризотил-асбест – огнеупорный материал, в качестве удобрений.

☉ **Группа каолинита.** В ней объединены полиморфы – силикаты алюминия состава  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ . Это диккит, накрит, галлуазит. В последнем есть слой молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , поэтому его формула  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Название перешло от китайцев «кау-линг» – высокая гора (так называлось месторождения каолина). Состоит в основном из кремнезема и алюминия. Внешне они неотличимы друг от друга, обычно образуют тонкодисперсные смеси, мучнистые, белые или более плотные глинистые массы и все вместе в таких общих агрегатах называются каолином.

Твердость около 1. В сухом виде землистые массы кажутся тощими на ощупь. Легко растирается между пальцами в сухом состоянии, в сухом виде хорошо поглощает воду, в мокром виде дает необычно пластичное тесто.

Образуется в корках выветривания алюмосиликатных пород (богатых полевыми шпатами, слюдами, цеолитами). Также образуются при низкотемпературных гидротермальных процессах, при слабом метаморфизме, при повышении температуры (ниже 300° С) каолиниты переходят в плотные породы – аргиллиты и филлиты, выше 300° С каолинит разлагается и переходит в другие алюмосиликаты: полевые шпаты, серицит (мусковит) и др.

☉ **Тальк  $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ .** Старинное арабское название минерала. Минерал выдержанного состава, изоморфная примесь двухвалентного железа не превышает 1,5–2 %. Он имеет светло-зеленый цвет. Встречается в плотных, жирных на ощупь массах, в составе сланцев и в мягких, с весьма совершенной спайностью крупных пластинах с перламутровым блеском. Это продукт гидротермального или контактово-метасоматического изменения богатых магнием ультраосновных пород, в которых было много оливина. Месторождения: Шабровское месторождение талькового камня (возле Екатеринбурга), известное еще с 20-х гг. 19 в. Крупные месторождения связанные с карбонатными породами известны в Канаде в Мэдокском округе.

Широко используют в промышленности в основном в молотом виде и отчасти в форме кускового талька. Размолотый тальк используют в бумажной, а также в резиновой промышленности в качестве наполнителя для увеличения объема без существенного изменения свойств. Высшие безжелезистые сорта используют в косметологии (пудры, мази, пасты, тени, румяна, помады). В производстве красок, мягких карандашей для стекла. При производстве хлопчатобумажных тканей. В керамической промышленности (электроизоляторы, глазури, кислото- и щелочеупорные сосуды) и многое другое.

☉ **Пирофиллит**  $\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ . Состав почти всегда идеально отвечает формуле. Назван от греч. «пирос» – огонь, «филлос» – лист, из-за способности минерала расщепляться на тонкие листочки перед паяльной трубкой.

Используется в случае больших скоплений в бумажной, керамической, строительной (огнеупорный камень), электротехнической (изоляторы), резиновой (наполнитель) и других отраслях подобно тальку. В древние времена в Китае плотные разновидности его, известные под названием «китайского агальматолита», «пагодита» употреблялись для изготовления различных безделушек, статуэток, т. е. как поделочный камень. Полупрозрачные разновидности пирофиллита и сейчас в камнерезной промышленности называются агальматолитами. «Агальма» по-гречески – статуя.

Красивые бледнозеленые с перламутровым отливом звездчатые и пластинчатолучистые агрегаты встречаются в кварцевых жилах в районе Екатеринбурга. Встречается на Южном Урале. Крупные месторождения агальматолита известны в Китае. В виде пирофиллитового сланца распространен в некоторых штатах США. В Бразилии, близ Оуро-Прето (шт. Минас-Жерайс) в виде листоватых агрегатов в ассоциации с топазом.

## ЛЕКЦИЯ 13

☉ **Группа монтмориллонита.** Это большая группа глинистых минералов, силикатов и алюмосиликатов магния и алюминия.

Это магнезиальные и алюминиевые глинистые минералы. Идеальными предельными составами этих минералов являются  $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (сапонит),  $\text{Al}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (бейделлит). В монтмориллонитах в отличие от талька и пирофиллита пакеты по-иному развернуты и смещены относительно друг друга, а в межпакетном пространстве размещаются молекулы конституционной  $\text{H}_2\text{O}$ . В реальных природных условиях состав и структура сложнее. Межпакетными одновалентными ионами могут являться  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ , а двухвалентными –  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ . Монтмориллониты могут обмениваться межпакетными ионами с ионами окружающих водных растворов, а также поглощать крупные органические катионы (так образуются органоминеральные комплексы). При поглощении молекул воды монтмориллониты набухают за счет расширения межпакетного пространства; при нагревании или в сухой атмосфере вода и гидратированные катионы удаляются из монтмориллонитов, кристаллы уменьшаются в размере – набухают в присутствие воды.

Монтмориллониты образуют чрезвычайно тонкодисперсные плотные массы, слагают основной объем глины.

Монтмориллонитовые глины используются в нефтяной промышленности, где они используются при очистке продуктов перегонки нефти от посторонних примесей (смола, углистых веществ и др.). В текстильной промышленности для очистки материала от жиров при окраске. В резиновом производстве, так же как и каолиновые глины в качестве наполнителя для придания жесткости, кислотоупорности, прочности и пр. В мыловаренной и косметической промышленности при производстве мыла, пудры, грима, губной помады, зубной пасты и др. Применяют также для очистки воды и пищевых продуктов (масел, вина и др.). При производстве бумаги, керамики, при изготовлении лекарств (как связующее вещество, как адсорбент и т. д.).

### Группа слюд

Слюды принадлежат к числу широко распространенных минералов. В земной коре их около 4 %. В основном в кислых породах и кристаллических слюдяных сланцах. Выделяют три подгруппы слюд: флогопита биотита (железо-магнезиальные), мусковита (алюминиевые) и лепидолита (литиевые).

Наиболее важное свойство слюд заключается в их электроизоляционных качествах. В промышленности применяется листовая слюда, слюдяной порошок и различные фабри-

каты. Наиболее ценная листовая слюда находит применение в электропромышленности: для изоляторов, конденсаторов, реостатов, телефонов и др. Слюдяной порошок используется при изготовлении огнеупоров (строительных материалов), обоев, бумаги, огнеупорных красок, различных керамических изделий, автомобильных шин, смазочных материалов и др. Слюдяные фабрикаты (миканит) применяется в качестве заменителей листовой слюды в менее ответственных случаях (бытовых электроприборах и др.).

Лепидолит вместе с циннвальдитом являются одним из главных источников получения солей лития, применяющихся при изготовлении щелочных аккумуляторов (для подводных лодок), получения специальных оптических стекол (флинтгласа, опаловых и белых стекол), в пиротехнике (яркий красный свет), медицине, синтезе органических соединений, фотографии, рентгенографии и в многих других областях науки и техники.

☉ **Подгруппы флогопита и биотита.** Флогопиты – это непрерывный ряд  $Mg - Fe$ -слюд с исходным составом  $KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$ . Железо только двухвалентное занимает позиции магния. По мере увеличения содержания железа среди слюд ряда выделяют железистый флогопит и флогопит. Биотиты изоморфный ряд железо-магнезиальных слюд, но в отличие от флогопита содержат трехвалентное железо. Ряд изменяется от магнезиального биотита, биотита, железистого биотита, лепидомелана. Крайний член ряда называется аннитом и имеет формулу  $KFe_3^{2+}(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$ . «Флогопос» от греч. – огнеподобный (имеется в виду цвет минерала). Биотит – от фамилии Ж. Б. Биота.

Флогопит и биотит встречаются в чешуйчатых массах, пластинках, хороших таблитчатых и бочонковидных кристаллах, иногда гигантских. Цвет зеленый, бурый, черный в зависимости от содержания и соотношения двух- и трехвалентного железа. Чистый безжелезистый флогопит бесцветен, воднопрозрачен.

В некоторых случаях в позиции магния появляется марганец. Бывают также барийсодержащие флогопиты (барий размещается в позициях калия) и барий титановые флогопиты.

Месторождения флогопита – Слюдянское (у оз Байкал, ст. Слюдянка Забайкальской ж.д.). Здесь размеры бочонковидных кристаллов могут достигать 1,5 м в длину. При выветривании железистые флогопиты светлеют и окрашиваются в голубой цвет. В Ильменских горах биотит в виде крупных пластин размером до 0,5 м в диаметре в пегматитовых жилах. Огромные пластинчатые кристаллы биотита наблюдались в пегматитах Гренландии и Скандинавии (в Евье была встречена пластина биотита размером 7 м<sup>2</sup>).

☉ **Подгруппа мусковита.** Главным минералом этой подгруппы является сам мусковит – чисто или почти чисто алюминиевая слюда. Ее формула –  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$ . От названия г. Москвы – Муска. В редких случаях в мусковите часть алюминия замещена хромом (фуксит) – ярко-зеленая слюда. Есть мусковиты с частичной заменой калия на барий. Редкие группы мусковитов – чисто натриевая (парагонит) и чисто ванадиевая слюды.

Мусковит обычно встречается в таблитчатых, листоватых, бочонковидных кристаллах светло-розового, коричневого, серого цвета. В тонких спайных пластинках он бесцветен. Крупные кристаллы встречаются в гранитных пегматитах, грейзенах, гнейсах и сланцах. Но есть одна необычная морфологическая разновидность мусковита «серицит» – этот термин лишний для классификации, но удобный при описании пород и месторождений. Серицит – это желтая мелкочешуйчатая, иногда плотная скрытокристаллическая масса мусковита, развивающаяся в виде псевдоморфоз по полевым шпатам при их гидротермальных изменениях.

Слюдяные месторождения распространены в Мамском районе Восточной Сибири. Здесь широкая слюдоносная полоса метаморфических сланцев с мусковитом размером до 50 см с красноватым или желто-зеленоватым оттенком. Слюда совершенно прозрачна, легко расщепляется на тонкие листы с гладкой поверхностью.

Также месторождения мусковита известны в Индии (Бенгальский и Мадрасский районы), где встречаются кристаллы мусковита до 3–5 м<sup>2</sup> и больше.

☺ **Подгруппа лепидолита** «Лепидос» по-гречески чешуя. Принадлежит к числу редких слюд.

В эту группу минералов входят различные по формуле, но всегда содержащие литий слюды. Литий обладает геохимическим сродством с магнием и алюминием, но не с калием, поэтому занимает октаэдрические позиции (магния и алюминия). Сумма атомов лития, алюминия и магния должна быть не менее 2 и более 3. Число атомов калия во всех литиевых слюдах неизменно и равно 1. Условно все составы литиевых слюд можно разбить на три главных типа: первый – это составы как бы производные от формулы флогопита, второй и третий – от мусковита.

К первому типу относится **гайниолит**  $\text{KLiMg}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2$ . Это как бы флогопит, в котором произошла замена  $\text{Mg}^{2+} + \text{Al}^{3+}$  на  $\text{Li}^+ + \text{Si}^{4+}$ , т. е. это силикат, а не алюмосиликат.

К второму типу относят **циннвальдит**  $\text{KLiAlFe}^{2+}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2$ . От местности Циннвальд в Рудных горах (Саксония). Это как бы мусковит, в котором произошла замена  $\text{Al}^{3+}$  на  $\text{Li}^+ + \text{Fe}^{2+}$

Из формулы мусковита выводится и формула **трилитионита** –  $\text{Li}_{1,5}\text{Al}_{1,5}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$ .

Есть и другие литий-алюминиевые слюды. В общем случае, все слюды третьего типа называют лепидолитами.

Цвет лепидолита белый, но чаще розовый, бледно-фиолетовый, иногда персиково-красный (из-за присутствия марганца). Твердость 2–3. Листочки гибки, упруги.

Макроскопически литиевые слюды (особенно лепидолиты) узнаются по цвету, т. к. в них в позициях магния и алюминия присутствует элемент-хромофор марганец.

Есть месторождения литиевых слюд на Среднем Урале, близ Розены в Моравии, на о. Уте (в Швеции, возле Стокгольма), в США (шт. Мэн), Циннвальд в Рудных горах, Корнуолл (Англия).

☺ **Группа гидрослюд.** Так называют разнообразные богатые водой слюды. В них в межпакетном пространстве, полностью или частично замещая калий, находятся комплексы с водой. Наиболее распространены такие гидрослюды, как вермикулит, гидромусковит, глауконит, иногда к ним относятся иллиты.

**Вермикулит** представляет собой гидратированный флогопит. В отличие от флогопита вермикулит хрупкий. Обладает жирным блеском, спайные пластинки потеряли упругость, изгибаются, словно сырая бумага. При прокаливании из минерала убирается вода, но при этом происходит вспучивание (иногда его объем увеличивается в 10 раз). Обладает высокой способностью к катионному обмену, гораздо большему, чем монтмориллонит (прекрасный сорбент). Используется как звукоизолятор в самолетах. В производстве краски для обоев. Как смазочный материал. Теплоизолятор.

Крупное месторождение Либби в США (шт. Монтана) и месторождения в западной Австралии.

**Глауконит** является железистой (с  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ ) гидрослюдой. Это синий или зеленый минерал, встречающийся в виде мельчайших округлых агрегатов и коллоидных выделений в глинах, мергелях, доломитах.

Огромное месторождение глауконита на Украине (в пределах Южно-Русской впадины). В глауконитовых песках часто обнаруживаются фосфоритовые желваки. Вдоль Восточного склона Урала, в Казахстане, Поволжье и др.

Используют как калиевые удобрения после соответствующей обработки, дешевая защитная краска (стойкая к кислотам, щелочам, не ядовита и др.). В пищевой промышленности для смягчения жестких вод в пивоваренной, винокуренной, текстильной и других отраслях промышленности. Это применение основано на способности глауконита к катионному обмену, при этом поглощаются щелочноземельные катионы воды, а в раствор переходят ионы натрия, чем и уничтожается жесткость воды.

☺ **Группа хлоритов.** Это большая, сложная по составу группа минералов (силикатов и алюмосиликатов) с симметричными двухслойными пакетами и со слоями комплекс-

ных катионов между ними. Главный представитель – клинохлор (пеннин)  $Mg_5Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8$ . Он образует изоморфный ряд минералов, которые продолжаются и в сторону магнезиальных безалюминиевых хлоритов до состава  $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ . По формуле это серпентин, но структура его отлична от серпентиновой. Все эти хлориты по их составу можно назвать магнезиальными. В идеале они бесцветны. В них магний часто замещается железом. Так образуются железистые хлориты. Полностью железистые хлориты называются тюрингитами. Магнезиально-железистые хлориты имеют зеленый цвет, образуют чешуйчатые массы, реже – отдельные таблитчатые кристаллы. Часто встречаются в виде псевдоморфоз по пироксенам, роговым обманкам, флогопитам, биотитам. Железистые хлориты слагают оолиты в составе некоторых осадочных пород и сланцев.

В некоторых хлоритах имеется хром. Это кочубеит и кеммерерит. Они встречаются в хромитовых рудах в виде чешуйчатых масс и мелких вкраплений, образовавшихся здесь за счет изменения оливина, и окрашены в яркий розовый, карминно-красный и фиолетовый цвет.

Известны также цинковые, литиевые, никелевые хлориты.

☉ **Чароит**. Имеет сложную формулу с различными вариантами написания. Одна из предлагаемых формул (Е. И. Семенова)  $K_2NaCa_5[Si_4O_{10}]F \cdot 3H_2O$ . Моноклинная сингония. Был открыт в 1978 г. В. П. и Ю. Г. Роговыми. Он очень быстро стал одним из самых популярных ювелирно-поделочных камней. Этот минерал имеет яркую окраску – от нежно-сиреневой до густой искрящейся фиолетовой. Камень отличается тонковолокнистым строением, и при полировке на нем выявляется красивый узор из тонких, сливающихся друг с другом струй различных сиреневых и фиолетовых оттенков. Месторождение чароита Сиреневый камень находится в пределах Мурунского щелочного массива на стыке Иркутской, Читинской областей и Якутии в среднем течении р. Чары (притока р. Лены), откуда и произошло его название. Чароит – главный породообразующий минерал в метасоматических калиеполевошпатовых горных породах, в которых его содержится 50–90 %.

## УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Слоистые силикаты и алюмосиликаты обычно являются минералами низких температур и давлений. Лишь мусковит, флогопит, биотит, литиевые слюды встречаются в магматических горных породах. В целом для магматических пород (эндогенные условия) характерны слюды, тальк, хлориты, серпентины, пирофиллит. В экзогенных условиях формируются минералы группы каолинита, монтмориллонита, гидрослюд, некоторые серпентины и хлориты.

Слюды мусковит, флогопит и биотит, образуются в магматических горных породах как первичные минералы и как постмагматические (вторичные) продукты изменения первичных магматических минералов оливина, пироксенов, роговых обманок, полевых шпатов. В эффузивных породах биотит встречается в виде вкраплений. Особо крупные кристаллы слюд образуются в керамических и слюдяных пегматитах. В сподуменовых пегматитах наряду с биотитом и мусковитом присутствуют литиевые слюды.

Флогопит и мусковит используются как диэлектрики в радио-и электротехнической промышленности. Промышленные концентрации крупных кристаллов флогопита установлены в особых щелочно-ультраосновных породах, мусковит разрабатывается в гранитных пегматитах.

Другим характерным типом месторождений слюд являются грейзены. Слюды здесь образуются за счет разложения полевых шпатов и образуют мелкочешуйчатые массы.

В метаморфических породах (гнейсах и сланцах) слюды очень часто являются главными минералами. Крупные кристаллы флогопита, биотита в ассоциации с кальцитом, диопсидом и шпинелью образуются на контакте сланцев с мраморами в виде метасоматических жил и залежей, иногда вне контакта с мраморами.

Мусковит образуются при глубинном преобразовании глинистых пород с привнесением калия растворами.

Тальк и серпентин образуются в ультраосновных породах как обычный продукт гидротермальной переработки оливинов и пироксенов.

Серпентин в виде асбеста используется как жаростойкий минерал. Никелевый серпентин используется как руда на никель и встречается в корах выветривания ультраосновных пород.

Пирофиллит образуется в сходных с серпентином и тальком условиях, но за счет гидролиза алюмосиликатов кислых пород. Используется для производства изоляторов. Агальматолит – поделочный камень.

Хлориты обычно либо являются продуктами позднего и низкотемпературного гидротермального изменения оливина, пироксенов, роговых обманок, биотитов, флогопитов, либо образуются как минералы низких ступеней регионального метаморфизма. Железистые хлориты входят в состав глин, они имеют сложное оолитовое строение, иногда являются рудой на железо.

Минералы групп каолинита, монтмориллонита, палыгорскита, гидрослюд, некоторые серпентины и хлориты образуются в поверхностных и подводных условиях и слагают глины. Их иногда так и называют «глинистые минералы». Алюминиевые минералы (каолинит, галлуазит, бейделлит и др.) развиваются в коре выветривания кислых пород (гранитов, риолитов), а затем при дальнейшем выветривании и преобразовании превращаются в бокситы. Залежи каолиновой глины образуются в спокойных водоемах при перемыве, отмучивании каолинистых кор выветривания.

Магниевые минералы – сапонит, вермикулит, никелевые серпентины, нонтронит – образуются в корах выветривания на ультраосновных и основных породах.

В условиях морского (подводного) придонного разложения горных пород и за счет раскристаллизации придонных коллоидных осадков формируются монтмориллониты и гидрослюды, магнезиально-железистые хлориты. Уплотняясь они превращаются в типичные глины. Главная масса глин образуется именно в ходе процессов подводного «выветривания» горных пород и последующей эпигенетической переработки этих продуктов.

Глины являются ценным строительным материалом и сырьем для керамической и фарфоровой промышленности. Высокими сорбирующими свойствами характеризуются чисто монтмориллонитовые глины. Они известны под разными названиями – бентонит, гумбрин, кил и др.

## **КАРКАСНЫЕ АЛЮМОСИЛИКАТЫ**

Многие из силикатов (вернее алюмосиликатов) этого подкласса относятся к числу породообразующих и наиболее распространенных в природе минералов. В первую очередь это полевые шпаты – главные составные части гранитов, диоритов, габбро, гнейсов и других горных пород. К этому же подклассу минералов относятся нефелин и лейцит (основные минералы некоторых щелочных горных пород). Среди них и ценное нерудное сырье (микроклин, цеолиты), и минералы-руды некоторых металлов – нефелин (руда на алюминий), поллуцит (руда на цезий).

## **КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ**

В состав каркасных алюмосиликатов большей частью входят катионы с крупными ионными радиусами: калий, натрий и кальций (реже  $Ba^{2+}$ , еще реже  $Cs^+$  и  $Rb^+$ ). Катионы двух- и трехвалентного железа, магния, марганца отсутствуют. В кристаллических структурах участвуют анионные комплексы, состоящие из тетраэдров  $SiO_4$  и  $AlO_4$ . При этом число ионов кремния, замещенных ионами алюминия, не превышает половины. Обычно устанавливаются стехиометрические соотношения Si:Al либо 3:1, либо 1:1. Поэтому комплексные анионы могут быть выражены формулой  $[Si_3AlO_8]^{1-}$ ,  $[Si_2Al_2O_8]^{2-}$ ,  $[Si_3Al_2O_{10}]^{2-}$  и др. «Рыхлость» каркасной структуры допускает частое вхождение в них дополнительных анионов ( $Cl^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$  и т. д.) и конституционной воды в виде молекул  $H_2O$ , например, в цеолитах. Это, так называемые, структуры внедрения. Представителями такой под-



группы являются цеолиты. В цеолитах как при обезвоживании, так и при обводнении или замещении их молекулами других веществ (например, спирта) кристаллические структуры не разрушаются. Эти характерные свойства цеолитов объясняются существованием в них «каналов», достаточно свободных для продвижения как молекул воды, так и других веществ. Также важной особенностью структур этой подгруппы (цеолитов) является способность к обмену катионами ( $\text{Na}^+$  может замещаться другими ионами –  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $[\text{NH}_4]^+$  и др., содержащимися в растворах. При этом структуры не изменяются.

Структуры каркасных алюмосиликатов сложные и многообразные: имеется много разных вариантов соединения тетраэдров в трехмерном пространстве.

## **МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Морфология кристаллов и их симметрия различны у разных минералов данной подгруппы, что определяется большим разнообразием кристаллических структур каркасных алюмосиликатов. Изометрично развитые кристаллы имеют лейцит, содалит, лазурит, анальцит (все они характеризуются кубической или псевдокубической симметрией). Часто более или менее изометричные кристаллы полевых шпатов и нефелина, хотя они относятся к моноклинной, триклинной и гексагональной (нефелин) сингониям. Есть каркасные силикаты столбчатого, шестоватого облика (скаполиты, натролит), таблитчатого (пластинчатого) – гейландит, стильбит.

Физические свойства минералов, обладающих трехмерно развитыми анионными радикалами в кристаллических структурах, характеризуются некоторыми особенностями, сочетающимися с одной стороны сильные ковалентно-ионные связи, а с другой «рыхлый» каркас.

1. Твердость минералов данной подгруппы колеблется между 5 и 6, т. е. уступает лишь островным орто- и диортосиликатам, что связано с сильными ковалентно-ионными связями.

2. Имеют меньшие удельные веса, которые также связаны с их «рыхлой» структурой. Плотности 2,1–2,6 г/см<sup>3</sup>.

3. Прежде всего, они обладают светлыми окрасками, т. к. не содержат в большинстве случаев элементы-хромофоры. Однако у каркасных силикатов по сравнению с силикатами других классов проявлены собственные цветные окраски, связанные не с хромофорами, а с «красящими» центрами – дефектами в структуре минералов. Такова, например, природа чернильно-синей, густо-синей окраски содалита и лазурита. Благодаря «ячеистой», «пористой» структуре в их состав входят несоразмерные с ионами кислорода дополнительные анионы с явно иными химическими связями.

4. Минералы рассматриваемой подгруппы в целом обладают наименьшими показателями преломления по сравнению с силикатами других подгрупп, что объясняется меньшей компактностью кристаллических решеток каркасных алюмосиликатов.

5. Часто имеют совершенную или ясную спайность по нескольким направлениям (двум – трем), что объясняется тем, что в некоторых направлениях в структурах минералов имеются более тесные упаковки анионных тетраэдров.

6. Характер связи обуславливает стеклянный блеск и прозрачность или полупрозрачность минералов.

Подобие свойств каркасных силикатов делает их похожими друг на друга и затрудняет их диагностику. Поэтому надо стараться по морфологии, спайности и другим физическим свойствам научиться их диагностировать, т. к. эта группа минералов необычайно важна.

## ЛЕКЦИЯ 14

### Каркасные алюмосиликаты

#### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

**Группа полевых шпатов.** «Шпат» – общее название минерала, а полевой из-за того, что минерал очень распространен и часто находится под ногами – в поле. Полевые шпаты наиболее распространенные минералы из всех рассмотренных групп. Они составляют около 50–60 % всех минералов земной коры, преобладающее количество (около 60 % приходится на магматические, 30 % – на метаморфические и 10 % на осадочные породы). В осадочных породах полевые шпаты встречаются в виде галек, песчинок и отдельных окатанных зерен.

По своему химическому составу полевые шпаты представляют собой алюмосиликаты Na –  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , K –  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , Ca –  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ , и реже Ba –  $\text{Ba}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ . Иногда в ничтожных количествах присутствует литий, цезий и рубидий в виде изоморфной примеси к щелочам и стронций, замещающий кальций.

Другой особенностью этих минералов является способность образовывать изоморфные ряды. Таковы, например ряд  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) - \text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ ;  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) - \text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ;  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) - \text{Ba}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ . Кристаллизуются эти минералы в моноклинной и триклинной сингониях, причем все они по морфологическим признакам мало отличимы друг от друга. Все полевые шпаты имеют сходные структуры.

Много общего и в физических свойствах минералов. Светлые окраски, низкие показатели преломления. Тв. 5–6,5. Совершенную спайность по двум направлениям под углом около  $90^\circ$ , сравнительно небольшие плотности 2,5–2,7 г/см<sup>3</sup>. По этим признакам их можно довольно легко отличить от похожих на них минералов.

В крупнокристаллических массах они наблюдаются в пегматитах в ассоциации с кварцем, крупнокристаллической слюдой и редкими минералами, содержащими летучие компоненты турмалином, бериллом, топазом и др. В миароловых пустотах пегматитов встречаются крупные хорошо образованные кристаллы полевых шпатов.

Соответственно особенностям и составу полевые шпаты разбиваются на три подгруппы:

- 1) Подгруппа кали-натриевых полевых шпатов, которые при высоких температурах также способны давать непрерывные твердые растворы  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) - \text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ . Содержащаяся в них примесь  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$  совершенно незначительна.
- 2) Подгруппа натриево-кальциевых полевых шпатов – плагиоклазов, которые представляют непрерывный изоморфный ряд  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) - \text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ ; нередко в незначительном количестве присутствует примесь  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ .
- 3) Подгруппа редко встречающихся кали-бариевых полевых шпатов, называемых гиалофанами, представляющими изоморфные смеси  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) - \text{Ba}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ .

☺ **Калиевые полевые шпаты.** К этой подгруппе относятся **микроклин** (трикл.), **ортоклаз**<sup>4</sup> (мон.), **санидин** (мон.) – полиморфы состава  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ . В них почти всегда проявлено изоморфное замещение калия натрием, поэтому более полная их формула  $(\text{K},\text{Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , а сами полевые шпаты часто называют калиево-натриевыми. Из-за большой разницы в размерах катионов  $\text{K}^+$  (0,133 нм по В. М. Гольдшмидту) и  $\text{Na}^+$  (0,098 нм) изоморфизм осуществляется только при высоких температурах и, в частности, при быстрой кристаллизации минералов. При последующем быстром охлаждении минерала натрий остается в позициях калия. Поэтому наиболее насыщены натрием обычно санидины (относительно высокотемпературные полевые шпаты), наименее микроклины (относительно низкотемпературные полевые шпаты). При медленном остывании первоначально гомо-

<sup>4</sup> «Ортоклаз» по-гречески – прямораскальвающийся.  
«Микроклин» – незначительно отклоняющийся.

генная кристаллическая фаза распадается на две: главная фаза существенно калиевая – это санидин, ортоклаз, микроклин, в зависимости от скорости охлаждения; вторая фаза существенно или чисто натриевая – это альбит  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ . Внешне такой двухфазовый агрегат представляет собой кристалл или зерно калиевого полевого шпата со строго ориентированными пластинчатыми вростками альбита, их называют пертитами. В санидине пертитов почти нет, в ортоклазе их больше, а в микроклине много и они более крупные – иногда толщиной до 1–1,5 мм.

Морфологически кристаллы всех трех минералов почти неотличимы друг от друга. Наиболее простые кристаллы чаще всего характерны для ортоклаза. Вообще же санидин, ортоклаз и микроклин отличаются друг от друга порядком расселения атомов алюминия в четверках тетраэдров ( $\text{T}_4\text{O}_8$ ), соединяясь вершинами, они образуют каркасный скелет структуры. В каждой такой четверке только один тетраэдр обязательно занят алюминием, отсюда анионный радикал имеет формулу  $(\text{AlSi}_3\text{O}_8)^-$ . И вот разница между тремя полевыми шпатами заключается в том, где располагается алюминий. В отличие от микроклина, в котором алюминий располагается строго в определенных тетраэдрах, в санидине он расположен хаотично (где придется), поэтому его структура считается неупорядоченной. Структура ортоклаза частично упорядоченная. Степень упорядоченности зависит от скорости кристаллизации. В молодых (мезо- и кайнозойских) эффузивах КППШ вкрапленников наиболее часто представлен санидином с хаотичным распределением алюминия по всем возможным позициям. В древних (протерозойских и архейских) гранитах, пегматитах, гнейсах, КППШ чаще всего является упорядоченным микроклином, гораздо реже встречается ортоклаз.

Существует еще одна разновидность калиевых полевых шпатов – это **анортоклаз**  $(\text{K,Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$  триклинной сингонии. Переводится с греч. как не ортоклаз. В виде примеси часто содержит  $\text{CaO}$  (иногда до нескольких процентов). Анортоклазами называются полевые шпаты, в которых содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  больше, чем  $\text{K}_2\text{O}$ . Это гомогенные высокотемпературные полевые шпаты, которые встречаются в породах богатых натрием.

Общая особенность калиевых полевых шпатов – образование простых двойников сростания и прорастания, этим они отличаются от плагиоклазов, у которых двойники полисинтетические.

Цвет минералов белый, серый, розовый (от вростков гематита), серо-зеленый (от вростков эгирина или других цветных минералов), изумрудно-зеленый. Красивые разновидности минералов изумрудно-зеленого цвета называют амазонитом (чаще всего это микроклин). Причина окраски амазонита точно не установлена. По предположениям, она обусловлена появлением центров окраски за счет искажения в структуре минерала при изоморфизме



Блеск стеклянный на плоскостях спайности и хороших гранях, в изломе жирный, матовый. Имеются полупрозрачные ортоклазы без пертитовых вростков, с красивым мерцающим блеском и перламутровым переливом. Их называют лунным камнем (это нестрогое название, которое применяется к разным минералам с подобным эффектом).

Спайность проходит в двух направлениях под углом от  $90^\circ$  до  $90^\circ 41'$  по третьему пинакoidу (совершенная) и по второму (несколько менее совершенная). Излом неровный. Твердость эталонная для шкалы Мооса – 6.

Калиевые полевые шпаты образуются магматическим путем, в гидротермальных условиях, при процессах метаморфизма и других явлениях. Это главные породообразующие минералы гранитов и их пегматитов, сиенитов, нефелиновых сиенитов и др. Они образуют вкрапленники в кислых эффузивных горных породах. В гидротермальных условиях появляются чаще всего в высоко- и среднетемпературных месторождениях в составе рудных жил и окружающих породах (ореолах). В метаморфических горных породах (гнейсах, гранито-гнейсах) эти минералы появляются на стадиях максимального глубинного преобразования первично-осадочных и других исходных горных пород. КППШ часто об-

разуются в виде мельчайших зерен на стадии диагенеза при формировании песчаников, алевролитов, глинистых сланцев, известняков. Характерными вторичными изменениями калиевых полевых шпатов является их каолинизация при выветривании, серицитизация (мусковитизация) при высокотемпературных преобразованиях минералов.

КПШ являются сырьем для керамической промышленности. Для этих целей наиболее важны гранитные пегматиты, но качественных месторождений такого типа мало, поэтому разрабатывают некоторые граниты с высоким содержанием микроклина и ортоклаза.

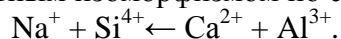
Узнаются по цвету, блеску, спайности, эталонной твердости. Друг от друга почти неотличимы. Поэтому их просто называют КПШ, оставляя точное определение, если это необходимо, до выполнения специальных (рентгено-структурных, кристаллооптических, гониометрических и др. исследований).

**Амазонит** имеет призматический облик кристаллов, в которых часто отмечаются полисинтетические и решетчатые двойники и пертитовые вроски, составляющие до 25 % от общей массы, образуя контрастный рисунок на зеленом фоне. Назван по месту находки в отложениях р. Амазонки. В настоящее время амазонит добывается карьерным способом на пегматитовых месторождениях Кольского полуострова (из него изготавливают мелкие художественные изделия, ювелирные вставки). В качестве облицовочного камня амазонит добывается на Майкульском месторождении (Джамбул). Прекрасные кристаллы и друзы известны на Урале (Вишневые горы), Кольском п-ове (Гора Парусная и Плоскогорское месторождение). Аналогичные месторождения известны также в Мадагаскаре, Бразилии и США.

Также известен другой поделочный калиевый полевой шпат – микроклин, который в сростании с кварцем образует интересное сочетание – **«еврейский камень»** или **«письменный» гранит**. Эти образования встречаются в краевых зонах пегматитовых тел месторождений Украины, Урала, Сибири.

**Адуляр**. Бесцветная прозрачная, молочно-белая разновидность ортоклаза. Связан с жилами альпийского типа (Приполярный и Средний Урал)

☉ **Кальциево-натриевые полевые шпаты**. Имеются два крайних минеральных вида **альбит** –  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$  и **анортит** –  $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$  и промежуточные по составу минералы. Все вместе они называются плагиоклазами. Их существование объясняется гетеровалентным изоморфизмом по схеме:



Состав плагиоклазов принято обозначать номером, который означает процентное содержание анортита в смеси. Всего, таким образом, имеется 100 номеров плагиоклазов, их условно разделяют на кислые (от 0 до 30-го номера), средние (30–70) и основные (70–100) плагиоклазы по содержанию в них  $\text{SiO}_2$ , которое уменьшается от кислых плагиоклазов к основным.

Для промежуточных разновидностей ряда плагиоклазов используются самостоятельные названия: альбит (номера с 0 по 10), андезин (30–50), лабрадор (50–70), битовнит (70–90), анортит (90–100). Однако такой непрерывный ряд гомогенных растворов в природе возможен только при высоких температурах. При понижении температуры в плагиоклазах происходят структурные превращения (распад). Образуются две фазы – кальциевая и натриевая в тесном сростании – своеобразные твердые растворы, которые видны только при очень больших увеличениях – обычно под электронным микроскопом (эти сростания называются перистеритом).

Сингония всех плагиоклазов триклинная. Морфология кристаллов такая же, как у калиевых полевых шпатов. Очень типично для плагиоклазов образование многократно повторяющихся (полисинтетических) двойников, так что каждый «монокристалл» состоит из множества пластинчатых индивидов толщиной в сотые-десятые доли миллиметра. Этим они отличаются от калиевых полевых шпатов, у которых двойники простые или решетчатые «микроклиновые решетки». Наиболее обычны двойники по альбитовому зако-

ну, в них соседние кристаллы срastaются по плоскости второго пинакоида – она является для них зеркальной плоскостью симметрии.

Цвет плагиоклазов белый, зеленый, серо-черный (от вростков других минералов), серо-синий, серо-сиреневый. У олигоклаза на плоскостях спайности отмечаются голубые радужные переливы (иризация). Они вызваны интерференцией света при прохождении его через перистериты и полисинтетические двойники, из которых состоят эти олигоклазы. Такое же внутреннее яркое радужное свечение характерно для лабрадоров.

Спайность совершенная в двух направлениях (по второму и третьему пинакоидам) под углом около  $86^\circ$ . Твердость 6–6,5. Плотность 2,61 (альбит) – 2,76 (анортит) г/см<sup>3</sup>.

Блеск стеклянный на спайности, в изломе жирный, матовый. На плоскостях спайности (на одной или реже – на обоих) видна штриховка – след полисинтетического двойничкования кристаллов.

Плагиоклазы образуются в магматических условиях. Они являются породообразующими минералами гранитов, диоритов, габбро, щелочных пород (интрузивных, эффузивных и жильных). В этих горных породах встречаются все плагиоклазы (кислые в кислых и щелочных породах, средние – в средних, основные – в основных). Наиболее крупные (гигантские) выделения плагиоклаза наблюдаются в гранитных пегматитах.

В типичных гидротермальных условиях (в грейзенах и других типах) образуется лишь альбит. Он разъедает своими сахаровидными массами более ранние минералы гранитов, сиенитов, пегматитов и нередко представлен агрегатом пластинчатых кристаллов замещающих первичные алюмосиликаты, а также щетками, стебельчатыми агрегатами в трещинах. Характерно, что альбиту сопутствует разнообразная редкометальная минерализация, в том числе и рудные минералы Zr, Ta, TR, Be и др.

В метаморфических породах плагиоклазы присутствуют в гнейсах, сланцах, амфиболитах и др.

В осадочных породах плагиоклазы содержатся в аркозовых песчаниках как обломочный материал. На стадии диагенетического преобразования осадков образуется альбит, который нарастает на первичные обломочные зерна полевых шпатов, а также замещает детритовый материал.

Практическое применение из всех плагиоклазов нашел лабрадор. Он используется как облицовочный камень.

Характерными продуктами гидротермального изменения плагиоклазов являются: кислых плагиоклазов – мусковит (серицит), основных – эпидот (соссюрит, скаполит, глинистые минералы и др.). При выветривании плагиоклазы замещаются каолинитом. Плагиоклазы легко узнаются по спайности и штриховке на ней, блеску, минеральной ассоциации, а олигоклаз и лабрадор – по радужным переливам на плоскостях спайности.

**Лабрадориты** были обнаружены в 18 в. на п-ове Лабрадор – это серые, почти черные с синеватым или зеленоватым оттенком породы, с ярко выраженной зональной иризацией. Лабрадорит раньше ценили очень высоко. Его месторождения были выявлены в 1835 г. при прокладке дороги в Волынской губернии (на территории нынешней Житомирской области). Широко используется в строительстве и камнерезном производстве, а отдельные иризирующие его участки идут на ювелирные украшения.

**«Солнечный камень»** – плагиоклаз, в котором рассеяны мельчайшие железистые пластинчатые минералы – гематит и гётит, отсвечивающие малиновым или красновато-оранжевым мерцанием на желтовато-молочном фоне. Раньше считали, что камень обладает самосвечением в красных тонах, отсюда и название. Солнечный камень встречается на Урале и в Сибири (Прибайкалье).

**Беломорит** – в России голубовато-белую разновидность олигоклаза, со своеобразным нежно-синеватым перламутровым отливом (эффектом лунного камня) называют беломоритом. Месторождения его известны в пегматитах Северной Карелии и Кольского п-ова совместно с кварцем и слюдами. Этот камень хорошо принимает зеркальную полировку и применяется в виде плоских вставок, которые сохраняют свой оптический эффект.

☺ **Данбурит  $\text{Ca}(\text{B}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$** . По составу оно является аналогом анортита, в котором вместо алюминия в тетраэдрах размещен бор. В кристаллической структуре так же, как и в полевых шпатах, имеются четверки тетраэдров, из которых как бы собрана вся структура. Образует удлиненно-призматические кристаллы ромбической сингонии с грубой штриховкой вдоль их удлинения. Бесцветный, иногда винно-желтый, прозрачный. Твердость 7–7,5. Плотность 3 г/см<sup>3</sup>. Блеск стеклянный. Встречается в составе ангидритовых осадочных толщ. Является компонентом промышленных руд бора. Красивые прозрачные кристаллы используются в ювелирном производстве, причем могут использоваться как имитация алмаза, которую неспециалисту довольно трудно отличить. Вообще же в основном является объектом коллекционирования.

☺ **Лейцит  $\text{K}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$** . Название от греч. – светлый. Образует кристаллы (нередко идеально развитые) в виде тетрагон-триоктаэдров. Они состоят из тончайших сдвойникованных пластинок тетрагональной сингонии, возникших при распаде первичного кристалла. Эти кристаллы встречаются в виде порфировых вкрапленников в некоторых щелочных эффузивных и жильных породах (базальтоидах). Полупрозрачные, бесцветные, со стекляннм блеском, спайность отсутствует.

Обладает диморфизмом: при температуре выше 620° С устойчива кубическая модификация, ниже этой температуры претерпевает полиморфное превращение в тетрагональную модификацию.

При остывании базальтового расплава лейцит очень легко и быстро замещается смесью нефелина и калиевого полевого шпата, такие псевдоморфозы называют псевдолейцитом. При замещении лейцита агрегатом микроклина, мусковита, цеолитов и др. образуются псевдоморфозы, называемые эпилейцитом.

При выветривании лейцит легко замещается анальцитом. А калий выносится в окружающие породы, обогащая их, в том числе и почвы, калием. На таких почвах в южных странах особо хорошо растут виноградники.

Узнается по форме кристаллов и приуроченности к вулканическим породам (эффузивам). Не встречается совместно с кварцем, т. к. при таких реакциях образуется микроклин.

☺ **Поллуцит  $\text{Cs}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$** . Назван в честь мифических близнецов Поллукса и Кастора. Из-за того, что. Когда его нашли в пустотках пегматитов на о. Эльба, они росли вместе с призматическими, тоже полупрозрачными и бесцветными кристаллами петалита (касторита). Это очень редкий специфический минерал сподуменовых гранитных пегматитов, которые легко узнаются по присутствию в них розового турмалина (рубеллита) и розовых литиевых слюд (лепидолита и др.). Сам поллуцит мало приметен, очень похож на кварц, но несколько отличается от него окраской, белесо-серой, как у разбавленного водой молока. Похож на белый полевой шпат, а еще больше – на бесцветный берилл, и отличить его можно разве по обилию трещинок, по специфическим тонким серо-сиреневым прожилкам лепидолита, да по характерному искрящемуся блеску. Определяется с трудом, в том числе по характерной ассоциации минералов.

Является рудой на цезий – второй по легкоплавкости металл после ртути (его температура плавления + 28,5 °С).

☺ **Нефелин  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$** . Специфический главный породообразующий минерал щелочных горных пород. Определяется по трем признакам. Во-первых, на поверхностях выветривания на месте нефелина (он легко разрушается) образуются углубления, каверны по форме его зерен, сам нефелин чуть покрыт пленкой порошковатых масс вторичных минералов. Во-вторых, в свежих сколах он имеет особенный мясо-красный, гнилостно-красный, зеленый цвет и жирный блеск (его так и называют – мясной, жирный камень), и в нем нет спайности. В-третьих, вместе с нефелином часто (но не обязательно) встречаются яркие, хорошо приметные минералы – сахаровидный апатит, розовый, малиново-красный эвдиалит, коричневые титанит и астрофиллит. Зерна и выделения нефелина бес-

форменные, но в некоторых щелочных эффузивах и в сиенитах можно обнаружить его хорошие кристаллы четырех и шестиугольного сечения.

Нефелин – главный минерал нефелиновых сиенитов и их пегматитов, используется как руда на алюминий. Его легко поначалу спутать с кварцем. Последний тверже, не выветривается, не бывает вместе с эвдиалитом, астрофиллитом. Нефелин и кварц – минералы антагонисты – они не могут кристаллизоваться из одного магматического расплава, т. к. при добавлении кварца вместо нефелина кристаллизуется альбит:



От полевых шпатов нефелин отличается по спайности.

☉ **Скаполит.** Название от греч. слов «скапос» – столб и «литос» – камень. Название, вероятно, из-за формы минералов. Серия минералов сложного состава. Упрощая, их можно трактовать как минералы непрерывного изоморфного ряда  $\text{Na}_4(\text{AlSi}_3\text{O}_8)_3\text{Cl} - \text{Ca}_4(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_3(\text{CO}_3, \text{SO}_4)$ . По составу они как бы аналоги плагиоклазов с дополнительными анионами  $\text{Cl}$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , но кристаллическая структура у них иная. Кристаллы тетрагонально-призматические, шестоватые, столбчатые. Цвет белый, зеленоватый, салатный, розовый. Блеск стеклянный. Плохая спайность вдоль удлинения. Образуется в скарнах, метаморфических горных породах, обогащенных кальцием.

## ЛЕКЦИЯ 15

☉ **Канкринит**  $\text{Na}_3\text{Ca}(\text{AlSiO}_4)_3(\text{CO}_3) \cdot 1,5 \text{H}_2\text{O}$ . Минерал очень близок по ряду свойств нефелину, но отличается присутствием добавочных анионов. Минерал щелочных (нефелиновых) горных пород и щелочных пегматитов, часто образует полные или частичные псевдоморфозы по нефелину, но может кристаллизоваться и независимо от него. Образует длиннопризматические выделения с явной спайностью по гексагональной призме. Цвет молочно-белый, розовато-белый, желто-коричневый. Блеск на спайности стеклянный, в агрегатах жирный. На поверхности легко выветривается. Покрываясь порошковатыми пленками вторичных минералов. От нефелина отличается отчетливой спайностью. Тв. 5–5,5. От полевого шпата отличается по углу спайности.

☉ **Содалит**  $\text{Na}_4(\text{AlSiO}_4)_3\text{Cl}$ . Образует серо-синие, чернильно-синие пятна и жилки в нефелиновых сиенитах. Является в них вторичным минералом.

☉ **Лазурит**  $\text{Na}_3\text{Ca}(\text{AlSiO}_4)_3(\text{SO}_4, \text{S}_2)$ . Встречается в виде густо-синих, лазурно-синих пятен, гнезд, жилок, вкраплений в мраморах. Образуется в метаморфических породах как реакционный минерал по контакту мраморов с гнейсами, сланцами и жилами гранитных пегматитов. Используется как декоративный камень и для изготовления синей краски.

☉ **Цеолиты.** Это большая группа каркасных алюмосиликатов (около 40). Каркасный остов их структур очень «рыхлый», до 50 % его объема занято большими полостями и «каналами». Они заселены крупными катионами (Ca, Na, K), способными к ионному обмену с окружающими растворами, и молекулами воды. Вода кристаллизационная, но в цеолитах, в отличие от кристаллогидратов с плотной кристаллической структурой, она может удаляться из полостей без нарушения каркасного остова структуры цеолитов. Это происходит при медленном нагревании минералов или при выветривании в жарком сухом климате. При смене условий вода может вновь поглощаться минералом. За свои особые свойства эта разновидность кристаллизационной воды получила название цеолитной. Обезвоженные цеолиты подобно губке обладают высокой сорбционной способностью. Они используются для очистки питьевой воды и понижения жесткости технических вод, для разделения органических молекул в химическом производстве как молекулярные сита, поглощающие молекулы одного размера и не пропускающие молекулы другого размера, большего, чем пустоты в минерале. Обезвоженные цеолиты применяются также для отгонки азота от кислорода, для очистки природного газа перед его транспортировкой по

газопроводам. Они являются прекрасными катализаторами в ряде химических производств, используются как добавки к корму животных для лучшего усвоения и переваривания пищи.

Цеолиты – низкотемпературные минералы. Они образуются либо гидротермальным путем (например, за счет изменения нефелина в щелочных породах, также отлагаются из растворов в пустотках и миндалинах лав. Образуются также в ходе диагенеза в осадочных, вулканогенно-осадочных, пирокластических породах (как продукт разложения полевых шпатов, вулканического стекла или как цемент), либо в почвах.

Цеолиты легко узнаются в щелочных горных породах, пустотках базальтов, где они обычно образуют крупные выделения – одиночные кристаллы, их щетки, радиально-лучистые, пластинчатые агрегаты. Все они в чистом виде белые, со стеклянным блеском, легкие (плотность 2,1–2,2 г/см<sup>3</sup>), не очень твердые (3,5–5). Из них стильбит (десмин) характеризуется пластинчатыми кристаллами с совершенной спайностью по таблитчатости, их плотными щетковидными агрегатами, с перламутровым блеском на плоскостях спайности. У натролита кристаллы призматические (квадратного сечения) шестоватые, с совершенной спайностью вдоль удлинения (в четырех направлениях под углом 45°, т. е. по двум ромбическим призмам), обычно сноповидные, радиально-лучистые сростки кристаллов. Анальцит характеризуется идеально развитыми кристаллами в форме тетрагон-триоктаэдров. Шабазит запоминается по форме кристаллов – это как бы чуть сдавленные по одной из осей «кубики» (ромбоэдры).

В осадочных горных породах, туфах, почвах цеолиты неузнаваемы, здесь из-за своей тонкозернистости они неотличимы от других составных частей пород и имеют окраску, общую с горной породой. Но для промышленных целей важны именно такие цеолиты. Среди них особенно ценны скопления клиноптилолита. Разрабатывается и используется вся горная масса, обогащенная цеолитами. Также широко распространены в осадочных породах ломонтит и филлипсит, последний характерен для океанических осадков.

## СОЛИ КИСЛОРОДНЫХ КИСЛОТ

В этом классе мы объединим минералы (карбонаты, бораты, фосфаты, арсенаты, сульфаты, вольфраматы, хроматы и некоторые другие), которые могут быть названы солями природных кислот (например, CaCO<sub>3</sub> – кальцит и арагонит, BaSO<sub>4</sub> – барит, CaWO<sub>4</sub> – шеелит). Ортосиликаты и метасиликаты, которые условно можно считать солями гипотетических природных кремниевых кислот, мы уже рассмотрели. Для всех этих соединений характерно наличие в их структуре комплексных анионов с ковалентной связью внутри аниона (по донорно-акцепторному механизму). Классическими примерами таких анионов являются группы (CO<sub>3</sub>)<sup>2-</sup>, (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>, (BO<sub>3</sub>)<sup>3-</sup>. Они участвуют в структурах минералов как самостоятельные компактные группировки атомов.

Среди типичных солей кислородных кислот, каковыми являются фосфаты и арсенаты, карбонаты, сульфаты, различают: а) кислые соли (с ионами водорода), например, CaHPO<sub>4</sub> – монетит. Возможно другое написание такой формулы – Ca(PO<sub>3</sub>OH); б) средние (нормальные) соли – кальцит CaCO<sub>3</sub>, ангидрит CaSO<sub>4</sub>; в) основные соли (с ионами гидроксидов) – малахит Cu<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)(OH)<sub>2</sub>, апатит Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH). В некоторых солях вместо гидроксильной группы может присутствовать анион F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, O<sup>2-</sup>. Например, известны апатиты состава Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F и Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Cl. Соли с анионами OH<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, O<sup>2-</sup> в минералогии называются солями с дополнительными анионами.

Соли могут быть безводными и водными, т. е. с молекулами конституционной (кристаллизационной) воды и без неё. Примеры водных солей: гипс CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, эритрин Co<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O.

Минералы этого класса могут быть простыми, двойными и сложными солями. Например, магнезит MgCO<sub>3</sub> и кальцит CaCO<sub>3</sub> – простые соли, а доломит MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – двойная, в ней кальций и магний занимают в структуре минерала свои самостоятельные и не-



равнозначные позиции. Двойной и в то же время основной солью является, например алунит  $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ . Сложной солью является полигалит  $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ .

## ФОСФАТЫ, АРСЕНАТЫ, ВАНАДАТЫ

В кристаллохимических структурах минералов этого класса присутствуют тетраэдры – сложные анионы  $(PO_4)^{3-}$ ,  $(AsO_4)^{3-}$ ,  $(VO_4)^{3-}$ . Кроме того, у ванадатов известны анионы  $(VO_5)^{5-}$ ,  $(VO_6)^{7-}$ ,  $(V_2O_8)^{6-}$  и более сложные. Во многих минералах присутствуют дополнительно  $OH^-$ ,  $F^-$ ,  $Cl^-$ , а также молекулы кристаллизационной воды. Из катионов наиболее часты  $Ca$ ,  $Al$ ,  $Fe$ ,  $Cu$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ; в урановые слюдки входит катион шестивалентного урана  $(UO_2)^{2+}$ .

Фосфаты и их аналоги принадлежат к довольно редким минералам, главные из них: апатит  $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ , монацит  $Ce(PO_4)$ , ксенотим  $Y(PO_4)$ , бирюза  $Cu(Al,Fe)_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$ , вивианит  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ , урановые слюдки (см. таблицу).

## КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛОВ

☉ **Монацит  $Ce(PO_4)$** . «Монайдезен» по-гречески – быть уединенным (отсюда происходит слово монах). Т. к. встречается в одиночных кристаллах. Моноклинная сингония. Помимо церия в минерал входят и другие редкоземельные элементы. Устанавливаются изоморфные примеси тория, в количестве до 32 %  $ThO_2$ , урана (до 7 %  $UO_2$ ) и др.

Встречаются в толстотаблитчатых и изометричных коричневых, оранжевых, коричнево-оранжевых одиночных редких кристаллах в гранитных пегматитах. Здесь они похожи на гранат, но отличаются наличием спайности и меньшей твердостью (5,5). Плотность 4,9–5,5 г/см<sup>3</sup>. Монацит в виде одиночных кристаллов отмечается в грейзенах и гнейсах. Наибольшие концентрации образует в россыпях (речных и морских), где наблюдается в песке в виде мельчайших коричневых зерен. Отсюда добывается как руда на торий и церий (только из россыпей).

Из месторождений следует отметить пегматиты Мадагаскара (в Анказобе и на горе Волхамбахитра), где встречаются его кристаллы очень крупных размеров (отдельные кристаллы до нескольких килограммов), а также большие речные и морские россыпи в Бразилии (шт. Минас-Жерайс), где его добывают.

Применение редких земель (в основном церия) очень разнообразно. Используют в различных легких и прочных сплавах (с алюминием, магнием и др.), при производстве особых сортов стекол, отражающих ультрафиолетовые и большую часть инфракрасных лучей, в качестве катализаторов в химической промышленности, в качестве красителей и многое другое.

☉ **Апатит  $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$** . Отмечаются примеси  $Sr$  (до 12 %  $SrO$ ),  $Ce$  (до 12 %  $Ce_2O_3$ ) и др. Сингония гексагональная. «Апатао» по-гречески – обманываю. Раньше его часто ошибочно принимали за другие минералы призматического или шестоватого облика – берилл, диопсид, турмалин и др.

Элементарная ячейка апатита в проекции на плоскость имеет вид ромба, по вершинам которого располагаются ионы  $F^-$ , сидящие на шестерных винтовых осях в центрах гексагонов. Ионы кальция занимают двоякое положение. Одни из них располагаются по длинным диагоналям ромбов (на расстоянии одной трети от вершин) на тройных поворотных осях и образуют непрерывные цепочки параллельно оси  $c$ . В этой колонке ион кальция связан с девятью кислородными ионами. Друг с другом эти цепочки связаны при помощи тетраэдрических анионных групп  $(PO_4)$  и в целом образуют как бы полые внутри цилиндры, в которых по оси каналов располагаются ионы  $F^-$ . В целом вся структура имеет гексагональный облик.

Часто образует хорошо ограненные бесцветные, зеленые, голубые (иногда черными) кристаллы призматического облика с гранями пинакоида по концам кристалла. Зерна могут быть прозрачными и полупрозрачными. Блеск от стеклянного до жирного. Твер-

дость эталонная – 5. Плотность 3,18–3,21 г/см<sup>3</sup>. Хрупок. Излом неровный, иногда раковинистый. Спайность несовершенная.

Широко распространенный минерал, обнаруживается почти во всех типах горных пород в виде небольшой (менее 1 %) примеси одиночных мелких кристаллов (размером 1–2 мм). Наиболее крупные и совершенные кристаллы встречаются в гранитных пегматитах, мраморах, но практического значения они здесь не имеют – их слишком мало. В промышленных концентрациях апатит встречается в щелочных породах (с нефелином), осадочных и метаморфических породах.

1. В щелочных породах они образуют частую вкрапленность зерен и их почти сплошные жилки, линзы, гнезда, мощные и протяженные залежи, где содержание апатита достигает 80 %.

2. В осадочных породах апатит слагает конкреции тонкоигольчатого строения, желваки, почки. Такие горные породы называются **фосфоритами**, их генезис химический, биогенный или биохимический. Другой тип фосфоритов – осадочные породы с многочисленными обломками ракушек, костей и другими органическими остатками, сложенными апатитом. Интересно, что подобный апатиту фосфат кальция входит в качестве главной составной части в твердые ткани животных и человека. Апатит в них имеет состав близкий к  $\text{Ca}_5((\text{PO}_4)_2(\text{CO}_3\text{OH}))(\text{OH})_2$ . В виде мельчайших кристаллов, обволакиваемых белковым веществом, он слагает волокна твердых тканей костей. В ходе диагенетического преобразования перекристаллизовывается в зернистый агрегат. Наконец, имеются карстовые фосфориты – это натечные, фарфоровидные массы, образующиеся химическим путем в поверхностных условиях. Во всех фосфоритах – гидроксил-apatит, с крайне незначительной примесью фтора и хлора.

3. Третий тип промышленных месторождений апатита – это пропласты доломитовых мраморов с апатитом среди гнейсов и кристаллических сланцев.

Апатит используется для получения ортофосфорной кислоты для производства суперфосфата, фосфора и других химических веществ (фтор – кремнефтористоводородная кислота). Используют в керамической промышленности (изготавливают так называемый «костяной фарфор»).

Месторождения: на территории Украины находится ряд крупнейших месторождений фосфорита. Огромный фосфоритоносный слой протягивается от Подолии (Западная Украина) до берегов Волги (Саратовская обл.) – на севере граница проходит по Курской, а на юге по южной окраине Донецкого бассейна. Фосфорит сильно песчанистый, залегает в виде желваков или слоев небольшой мощности. Другое очень крупное месторождение сплошных слоистых масс высококачественных фосфоритов в Южном Казахстане (хр. Кара-Тау). Из наиболее крупных месторождений также можно отметить пластовые залежи фосфоритов в западных штатах США (Вайоминг, Юта, Монтана), вдоль побережья Алжира, Туниса и Марокко.

☉ **Вивианит**  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Объединяет три гипергенных минерала – вивианит, эритрин и аннабергит. Вивианит обычно образуется в торфяниках, озерных органоминеральных отложениях (сапропелях), в болотных и озерных бурых железняках и формируется в ранние этапы диагенеза первичных отложений в восстановительной обстановке. Они также встречаются в пустотах захороненных ракушек. Обычно это землистые порошокватые массы голубовато-синего цвета, реже таблитчатые кристаллы с хорошей спайностью и перламутровым блеском, а также радиально-лучистые ростки таких кристаллов. В свежеизвлеченном состоянии он бесцветен, но в атмосферных условиях быстро, на глазах изменяет окраску на голубую, синюю, бурую, коричневую, черную за счет постепенного окисления железа.

Месторождений, в которых встречается вивианит много. Например, в Керченском месторождении бурых железняков (Крым) и на Таманском полуострове. Встречается на болотах. В случаях больших скоплений используется для изготовления дешевой синей краски.

**Эритрин**  $\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , образуется в зоне окисления скуттерудита и других минералов кобальт-мышьяковых руд в виде порошковатых налетов и масс ярко-розового цвета. Иногда встречаются его радиально-лучистые кристаллы и сноповидные сростки. Ярко-розовая окраска эритрина является хорошим поисковым признаком на месторождения кобальт-мышьяковых и урановых (тоже с кобальтом и мышьяком) руд. Растворяется в  $\text{HCl}$ , раствор имеет розово-красный цвет.

**Аннабергит**  $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  встречается в зоне окисления никелина и других минералов никель-мышьяковых руд в виде ярко-зеленых налетов и пленок. Яркий зеленый цвет аннабергита является хорошим поисковым признаком на арсениды никеля. Встречается на месторождениях руд арсенида никеля. В больших количествах был известен в месторождениях никелевых арсенидов Аннаберг и Шнееберг в Саксонии (Германия).

☉ **Урановые слюдки.** Это минералы торбернит  $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , отенит  $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , карнотит  $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (от фамилии А. Карно) и др. Образуются в зоне окисления урановых месторождений в виде землистых, порошковатых масс или хороших пластинчатых слюдоподобных кристаллов, также встречаются (торбернит) в зонах окисления пегматитов. Обычно наблюдается в небольших количествах по стенкам пустот выщелачивания, часто на лимоните. Характерны яркие окраски (желтая, желтовато-зеленая, зеленая), слюдоподобная спайность и перламутровый блеск на ней. Сильно радиоактивны.

Отэнит встречается в Отэн в департаменте Луара (Франция), Шнееберг, в Германии, пегматиты Мадагаскара и др. Карнотит встречается в провинции Катанга (Конго), Радиум-Хилл (Австралия) и др.

☉ **Бирюза**  $\text{Cu}(\text{Al,Fe})_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Синоним каллаит (древнее название бирюзы). Триклинный. Обычно распространен в скрытокристаллических массах почковидной формы или в виде корок, прожилок, скоплений неправильной формы. В виде кристаллов бирюза встречается чрезвычайно редко. Единственными проанализированными кристаллами, были образцы из США (шт. Виргиния). Эта бирюза состоит из тонких слоев ярко голубых сверкающих кристаллов. Она создает бархатистые массы, цементировавшие трещинки в стекловатом кварце. Размеры отдельных кристаллов бирюзы были 0,3 мм и менее. Обычно бирюза – это микро и скрытокристаллический агрегат.

Цвет голубой, зеленоватый. Блеск восковой. Твердость 5–6. Плотность 2,6–2,83 г/см<sup>3</sup>. Излом слегка раковистый. В кислотах растворяется. Непрозрачна. Хрупка.

Образуется в условиях выветривания, часто вместе с лимонитом, при воздействии меденосных поверхностных растворов на горные породы, содержащие глинозем (в полевых шпатах и др.) и фосфор (в виде апатита и др.). Иногда образуется за счет костей животных (одонтолит) в смеси с карбонатом кальция, апатитом и вивианитом. Одонтолит используется в виде имитаций бирюзы (тв. 5, плотность выше 3–3,5 г/см<sup>3</sup>).

Месторождения известны в Средней Азии в Кураминском (Бирюзакан, Шаугаз, и др.), где она добывалась с глубокой древности, т.к. существуют древние выработки. Крупнейшее месторождение в Армении (Техутское). С глубокой древности добывалась на Синайском полуострове (месторождения Сербит-Эль-Кхадим и Вади – Махаре, последнее, вероятно, до сих пор разрабатывается). Крупнейшие месторождения находятся в США (шт. Аризона, Колорадо, Невада, Нью-Мексико). Известны в Чили, Перу, Мексике, Австралии, Болгарии, Китае.

## СУЛЬФАТЫ

Минералы-сульфаты являются природными солями серной кислоты, есть среди них кислые, основные, средние соли и кристаллогидраты. Во всех этих минералах в их структуре есть обособленные сложные анионы – тетраэдры  $(\text{SO}_4)^{2-}$ . Вообще сульфатов в природе мало. Больше всего сульфатов железа, натрия, калия, алюминия, кальция, бария. Самыми распространенными являются гипс, ангидрит, барит, алунит, тенардит, мирабилит. Почти все сульфаты – экзогенные минералы, исключение составляют барит и алунит.

☉ **Группа барита.** В него входят два изоструктурных минерала – барит  $\text{Ba}(\text{SO}_4)$  и целестин  $\text{Sr}(\text{SO}_4)$  и их промежуточные по составу разновидности. «Барос» по-гречески тяжесть, а «целестис» по-латыни – небесный (первые найденные образцы целестина имели голубой цвет). Сингония ромбическая. Кристаллы ромбо-призматические или таблитчатые, часто прозрачные. Цвет белый, желтый, коричневый (от включений лимонита), голубой. Блеск стеклянный, жирный. Хорошо заметна (по трещинкам и ступенчатым сколам) совершенная спайность в трех направлениях 9по двум граням призмы и пинакоиду). Твердость 3,5. Высокая плотность – около  $4,5 \text{ г/см}^3$ . Кроме одиночных кристаллов эти минералы часто встречаются в щетках, друзах и зернистых массах. Барит образуется в гидротермальных средне- и низкотемпературных месторождениях, целестин встречается в виде секретий в осадочных горных породах.

Минералы группы барита узнаются по высокой плотности, спайности. Друг от друга отличаются по условиям нахождения в природе.

Барит используется для изготовления красок, в химической, резиновой, бумажной промышленности, для утяжеления бурового раствора с целью увеличения его давления на нефтегазоносные пласты и затруднения выбросов нефти и газа при бурении скважин. Целестин применяется при производстве сахара (для удаления сахара из меломассы), в пиротехнике, химической промышленности, фармацевтике, стекольной промышленности (иризирующие стекла, особые глазурованных кирпичей), в сплавах (с медью – прочность и однородность без снижения электропроводности).

☉ **Ангидрит  $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ .** Типичный минерал хемогенных осадков (эвапоритов). Слагает в толще осадочных пород зернистые сплошные мраморовидные массы (не вскипающие с соляной кислотой). Мощность пластов достигает иногда 1000 м, хотя может быть и толщиной с бумажный лист, ассоциирует в них с гипсом. Обнаружен во многих средне-температурных гидротермальных месторождениях сульфидных руд в виде крупных зерен и кристаллов белого, серого, сиреневого цвета с хорошей спайностью по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Также обнаружен в некоторых метаморфических породах. Используется как сырье для изготовления цемента и как поделочный камень. От гипса отличается по твердости – не царапается ногтем (3–3,5).

Крупные залежи ангидрита на глубине распространены в гипсоносных толщах толщах пермского возраста вдоль всего Западного Приуралья, в Архангельской, Вологодской областях, в Донбассе и др. местах.

☉ **Гипс  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .** Сингония моноклинная. Образует уплощенные и призматические кристаллы с совершенной спайностью по пинакоиду. Характерны двойники, так называемые «ласточкины хвосты». Кристаллы бесцветные, прозрачные. Блеск стеклянный и перламутровый. В агрегатах белый, полупрозрачный, непрозрачный. Твердость в кристаллах 1,5–2, в зернистых массах до 3.

Гипс образуется как низкотемпературный гидротермальный минерал, кристаллизуется из подземных вод в песчаниках и глинах, но чаще всего выпадает в виде гидрохимических осадков на дне усыхающих водоемов (пластов, чередующихся со слоями ангидрита и каменной соли).

Осадочные гипсы – это мелкозернистые массивные горные породы. В них в ходе перекристаллизации образуются жилы, гнезда, жеоды хороших кристаллов гипса и жилки параллельно-волокнутого строения. Кристаллы легко деформируются. Гипс может вырастать и на поверхности усыхающих, растрескивающихся глин в виде хорошо оформленных кристаллов (их можно собирать как грибы), при своем росте они отталкиваются, приподнимают глину, а сами вырастают чистыми.

Используется для производства цемента, в медицине, как скульптурный камень (алебастр).

Легко узнается по форме кристаллов, твердости, двойникам.

## ЛЕКЦИЯ 16

☉ **Мирабилит  $\text{Na}_2(\text{SO}_4) \cdot 10\text{H}_2\text{O}$** . Старинное название: sal mirabile Glauberi («Удивительная соль Глаубера»). Синоним – глауберова соль. Моноклинной сингонии. Типичный минерал в составе осадков, выпадающих зимой из усыхающих морских лагун и озер и вновь частично растворяющихся летом. Образует землистые, порошковатые массы, налеты слабого горько-соленого вкуса, бесцветные, желтоватые, зеленоватые. Легкий – плотность около  $1,5 \text{ г/см}^3$ .

В заливе Кара-Богаз-Гол (Каспийское море) в зимние месяцы, когда температура опускается ниже  $6^\circ$ , на дно в огромных количествах оседает мирабилит, который штормами частью выбрасывается на берег, образуя белые валы соли. В летнее время мирабилит переходит в раствор, а выброшенный на берег в верхних слоях обезвоживается, превращаясь в тенардит  $\text{Na}_2(\text{SO}_4)$ . Многочисленные мелкие высохшие озера Северного Прикаспия, Северо-Восточного Казахстана (Кулундинская степь), Северного Кавказа (к югу от Ставрополя), Закавказья, Крыма, а также Большое Соленое озеро (в штате Юта, США), озера Мексики, Аргентины и др. содержат большие массы мирабилита с тенардитом, переслаивающиеся с пластами галита, иногда гипса и др.

Мирабилит и тенардит используются для производства соды, а также в стекольной, красочной промышленности, в медицине как слабительное и др.

☉ **Алунит  $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$** . Синоним – квасцовый камень. Встречается как продукт гидротермальной переработки кислых эффузивов. Его образование объясняют воздействием на эффузивы гидротермальных сернокислых растворов.

Алунит встречается в виде сплошных халцедоновидных масс пестрой окраски (желтые, бежевые пятна алунита в буро-красной массе других минералов), рыхлых масс, замещающих эффузивы. Твердость этих агрегатов разная – от 7 до 3. Плотность  $2,6\text{--}2,8 \text{ г/см}^3$ .

Разрабатывается как алюминиевая руда и для попутного получения поташа. Месторождения: Индерское месторождение бора (к северу от Каспийского моря), в ряде солончаковых месторождений Калифорнии: Долина Смерти, в районе пустыни Уэлс у Керн, в Ланге (Лос-Анжелес) с колеманитом, в сухих районах Тарапака (Чили) и др.

☉ **Ярозит  $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$** . Назван по месту открытия – в Барранко Ярозо (Испания). Тригональный. Минерал зоны окисления сульфидов железа. Встречается в сплошных, порошковатых, зернистых массах охристо-желтого цвета. На ощупь более жирный чем лимонит и в этом их отличие.

## ВОЛЬФРАМАТЫ И МОЛИБДАТЫ

К этому классу относится около 40 минералов (собственно вольфрамитов и их аналогов – молибдатов). Среди вольфрамовых есть типичные соли с тетраэдрами  $(\text{WO}_4)^{2-}$  и  $(\text{MoO}_4)^{2-}$  в их структуре: шеелит  $\text{Ca}(\text{WO}_4)$ , вольфрамит  $(\text{Mn,Fe})(\text{WO}_4)$ , вульфенит  $\text{Pb}(\text{MoO}_4)$ , повеллит  $\text{Ca}(\text{MoO}_4)$ . Другие имеют цепочечную структуру.

☉ **Шеелит  $\text{Ca}(\text{WO}_4)$** . Отмечается изоморфная примесь Мо. Сингония тетрагональная, кристаллы дипирамидального облика, округлые зерна, неправильные выделения в кварце, кальците, диопсиде. Цвет белый, кремово-желтый, зеленоватый. Блеск жирный. Твердость 4,5. Спайность есть, но обычно заметна плохо. Большая плотность – около  $6 \text{ г/см}^3$ .

Минерал образуется в высокотемпературных кварцевых жилах и скарнах. Разрабатывается как руда на вольфрам. Узнается с трудом (форма напоминает сплюснутые октаэдры). Можно спутать с кварцем по жирному блеску и цвету, но шеелит мягче и имеет спайность. От кальцита отличается по жирному блеску и отсутствию реакции с соляной кислотой. Помогает диагностировать шеелит его свойство светиться в ультрафиолетовых лучах.

Значительные месторождения шеелита известны в западных штатах США, крупнейшее месторождение Крамат-Пулай в Малайе, где он встречается с касситеритом в метаморфизованных известняках и сланцах, а также в кварцевых жилах, затем в северной части о. Тасмания и других местах.

## ХРОМАТЫ

К классу хроматов относится около 10 минералов. Это соли хромовой кислоты с тетраэдром  $(CrO_4)^{2-}$  в их структуре.

☉ **Крокоит  $Pb(CrO_4)$** . «Крокос» по-гречески – шафран (из-за оранжево-красного цвета). Это главный минерал класса хроматов Моноклинный. Он образуется в зоне окисления свинцовых руд, извлекая хром из вмещающих руду горных пород. Встречается в виде сверкающих алмазным блеском ярких оранжево-красных призматических кристаллов с продольной штриховкой, а также в виде примазок по трещинкам в рудах и окружающих горных породах. Твердость 2,5–3, высокая плотность 6,0 г/см<sup>3</sup>.

## БОРАТЫ

К классу боратов относятся более 100 минералов разнообразной структуры, но почти всегда сходного состава. Это главным образом кальциевые и магниевые соли (кислые, средние; водные и безводные) борных кислот  $H_3BO_3$ ,  $HBO_2$ ,  $H_2B_4O_7$ . В боратах известны треугольные анионные группы типа  $(BO_3)^{3-}$ , и тетраэдры типа  $(BO_4)^{5-}$ . В них, во-первых, кислород может замещаться гидроксилом  $OH^-$ , во-вторых, они могут образовывать сложные группировки. Структуры боратов подобно структурам силикатов могут быть островными, цепочечными, ленточными, кольцевыми, слоистыми в зависимости от степени полимеризации анионных групп.

В природе наиболее распространены бораты кальция, магния, натрия – иньоит  $Ca(B_2VO_3(OH)_5) \cdot 4H_2O$ , ашарит  $Mg_2(B_2O_4OH)(OH)$ , колеманит  $Ca(B_3O_4(OH)_3) \cdot H_2O$ , пандермит  $Ca_2(B_4VO_7(OH)_5) \cdot H_2O$ , гидроборацит  $CaMg(B_2VO_4(OH)_3)_2 \cdot 3H_2O$ , уллексит  $NaCa(B_5O_6(OH)_6) \cdot 5H_2O$  (табл. 15).

Они образуются как гидрохимические осадки в составе гипсовых и ангидритовых толщ. При выветривании сульфаты выносятся, а бораты остаются. Такие месторождения имеют промышленное значение как источник сырья для получения бора и его соединений. Известны, кроме того, эндогенные минералы бора, образующиеся в скарнах, – людвигит  $(Mg,Fe)_2Fe(BO_3)O_2$  и др., в вулканических возгонах – сассолин  $H_3BO_3$ .

Все минералы бора (кроме людвигита) белого цвета или бесцветны. Колеманит образует шестоватые полупрозрачные кристаллы со спайностью вдоль удлинения и со стекляннм блеском, гидроборацит обычен в виде радиально-лучистых агрегатов, уллексит образует игольчатые массы. Пандермит и ашарит – в виде белых тонкозернистых плотных (пандермит) или порошкватых (ашарит) агрегатов. Иньоит часто образует полупрозрачные ромбоэдрические кристаллы, в изломе похожие на лимонную кислоту. Все эти минералы обычно встречаются совместно. Людвигит имеет черный цвет, образует радиально-лучистые агрегаты, часто чуть присыпанные белым порошком вторичного ашарита.

Месторождения: в районе оз. Индер (к северу от Каспийского моря) крупное месторождение боратов (здесь главным минералом бора является ашарит), крупные скопления колеманита в ассоциации с гипсом и другими боратами известны в штатах Калифорния и Невада (США) в виде высохших соляных озер и солончаков в районах с жарким сухим климатом. В Чили, блих Бакос-дель-Торо колеманит отлагается из горячих источников.

## КАРБОНАТЫ

К минералам класса карбонатов относятся соли угольной кислоты, чаще всего это соли кальция, магния, натрия и меди. Всего в этом классе известно около 100 минералов.

Некоторые из них очень широко распространены в природе, например, кальцит и доломит.

В структурах всех карбонатов четко выделяется обособленный треугольный радикал  $(\text{CO}_3)^{2-}$ , известны также минералы с добавочными анионами  $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$ .

Многие из широко распространенных карбонатов, а особенно кальцит, магнезит, сидерит, доломит имеют сходные черты морфологии кристаллов, близкие физические свойства, встречаются в одинаковых агрегатах и часто имеют переменный химический состав. Поэтому отличить их по внешним признакам, твердости, спайности бывает трудно, а порой и невозможно. Издавна используется простой прием диагностики карбонатов по характеру их реакции с соляной кислотой. Для этого наносят каплю разбавленной (1:10) кислоты на зерно карбоната. Кальцит реагирует активно, и капля раствора вскипает от выделяющихся пузырьков  $\text{CO}_2$ , доломит реагирует слабо, только в порошке, а магнезит – при нагревании. Более точно определяют карбонаты лабораторными методами: химическими реакциями, рентгеновскими исследованиями, оптическим методом.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛОВ

☉ **Кальцит  $\text{CaCO}_3$ .** Изоморфные примеси Mg, Fe, Mn, поэтому полная формула будет  $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})\text{CO}_3$ . Тригональный. Структуру кальцита можно изобразить в виде сплюснутого по оси  $L_3$  куба – ромбоэдра. В вершинах и центрах граней располагается кальций, а посередине ребер и в центре ромбоэдра радикалы  $(\text{CO}_3)^{2-}$ . Все анионные группировки ориентированы параллельно друг другу, обуславливая резкую анизотропию строения кристаллической решетки минерала и его оптических свойств. Проходя через такую структуру, свет максимально поляризуется и распадается на два луча с разной скоростью их распространения в кристалле и, значит, с разными показателями преломления. По сравнению с другими минералами это свойство выражено в кальците наиболее сильно, так что даже его тонкие пластинки раздваивают изображение.

Кристалл встречается в друзах в одиночных кристаллах разной формы – ромбоэдрических, призматических, пластинчатых и более сложных. Он обычен и в сплошных массивных зернистых массах, в виде зернистых прожилков, гнезд и отдельных бесформенных вкраплений. Кристаллы и зерна прозрачные, полупрозрачные. Цвет белый, изредка розоватый (от Mn), голубоватый (от Sr), а при загрязнении другими минералами – серый, ржавый, черный и т. п. Совершенная спайность в трех направлениях (по ромбоэдру). Блеск стеклянный, матовый, иногда (на плоскостях спайности) перламутровый. Твердость эталонная – 3. Плотность 2,6–2,8 г/см<sup>3</sup>.

Образуется в основном в известняках хемогенным путем. Иногда в связи с отложением углекислой извести из горячих источников образуются замечательные по рисунку тонкополосчатые плотные полупрозрачные разности, известные под названием «мраморного оникса». Иногда, кальцит, выпавший в теплых морях, содержит Mg. Также часто магнезиален кальцит в твердых тканях некоторых организмов. При метаморфизме известняки превращаются в мрамор. Кроме того, кальцит образуется в скарнах, в средне- и низкотемпературных гидротермальных месторождениях.

Известняки и мраморы используются как строительный материал, для известкования почв, получения извести, как статуарный камень. Прозрачные кристаллы кальцита (исландский шпат) являются ценным оптическим сырьем.

Месторождения исландского шпата по р. Нижней Тунгуске, приурочены к эффузивным породам – траппам. Здесь он залегает в виде жил и гнезд с гигантскими размерами монокристаллов. Многочисленные мелкие месторождения в Средней Азии в Зеравшано-Гиссарском, Пскем-Угамском и др. районах. Большой известностью пользуются крупнейшие месторождения Исландии среди эффузивов.

Мел распространен широко в отложениях мелового возраста Восточно-Европейской платформы (в районе Белгорода, Краматорска – Донбасс).

Мраморы красивых расцветок добывают на Урале в Уфалейском, Златоустовском и др. районах, в Карелии, Финляндии, Забайкалье, Крыму. Месторождения оникс-мрамора желтоватых и зеленоватых расцветок известны в Закавказье, Грузии, Армении. Очень известны высококачественные мраморы Италии (месторождения Каррары на восточном берегу Генуэзского залива) и Греции, служившие в свое время материалом для античных скульптур.

☉ **Родохрозит  $MnCO_3$** . «Родон» по-гречески – роза, «хрос» – цвет. Обычно встречается в зернистых массах и сферолитовых агрегатах, изредка – в ромбоэдрических кристаллах. Определяется по светло-розовому цвету, но нередко имеет белый, серый, зеленовато-серый цвет и тогда неотличим от кальцита и доломита. Содержит до 62 %  $MnO$ .  $MnCO_3$  образует с  $FeCO_3$  непрерывный изоморфный ряд. Часто содержит  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $Fe$  и др.

На воздухе окраска родохрозита с течением времени буреет (окисляется). Твердость 3,5–4,5 (царапается острием ножа). Плотность 3,6–3,7 г/см<sup>3</sup>. В соляной кислоте в холоде растворяется медленно, а при нагревании бурно вскипает.

Образуется как минерал осадочных месторождений марганца и некоторых гидротермальных месторождений. Ассоциирует с силикатами марганца браунитом, гаусманитом, а также баритом, кварцем. Сравнительно небольшое уральское месторождения с гидротермальным родохрозитом, ассоциирующим с пиритом и хлоритом и др. известно среди мраморизованных известняков возле Нижнего Тагила – Сапальское. Гораздо более широко распространен родохрозит в осадочных месторождениях марганца. Здесь он ассоциирует с сульфидами железа, опалом и др. Чиатурское месторождение (Закавказье), Полуночное (Северный Урал).

Гидротермальные родохрозиты (бедные фосфором, в отличие от осадочных родохрозитов) используются для выплавления ферромарганца. Осадочные родохрозиты используются для подшихтовки при выплавлении из железных руд чугунов и в химической промышленности.

☉ **Магнезит  $MgCO_3$** . «Магнезия» – область в Фессалии (Греция). Тригональный. Крайний член изоморфного ряда магнезит – сидерит. Содержит до 48 %  $MgCO_3$ . Встречается в перекристаллизованных, переработанных гидротермальными растворами доломитах в виде сплошных масс зернистого строения с пятнистой бело-серой окраской. Также образуется в гнездах и прожилках в серпентинитах в виде белых плотных фарфоровидных масс. Твердость 4. Плотность 2,9–3,1 г/см<sup>3</sup>. Узнается с трудом.

Используется как руда на магнезий и как огнеупорный материал (выдерживает температуру до 3000° С).

☉ **Сидерит  $FeCO_3$** . «Сидерос» по-греч. – железо. Крайний член изоморфного ряда сидерит – магнезит. Встречается в виде коричнево-бурых ромбоэдрических (чичевицепоподобных) кристаллов с сильным стекляннным (металловидным) блеском и в виде зернистых масс в гидротермальных среднетемпературных месторождениях в ассоциации с сульфидами железа и меди, железистым хлоритом и др. Основная масса сидерита образуется хемогенным путем в осадочных породах, а на стадиях позднего эпигенеза сидерит перекристаллизовывается с образованием конкреций. Является рудой на железо. Гидротермальные сидеритовые месторождения известны в Штирии (Альпы) и на побережье Бискайского залива (Испания), жильные близ Зигена (Германия), осадочные сидериты слагают часть крупнейшего Керченского месторождения бурых железняков, в Шотландии и Южном Уэльсе (Англия).

Легко узнается по ржавому цвету (но неокисленные зерна и кристаллы белые), плотности.

☉ **Смитсонит  $ZnCO_3$** . Вторичный минерал, продукт окисления сфалеритовых руд. Встречается в натечных, почковидных землистых массах, реже в кристаллах белого, зеленоватого, бурого цвета. Содержит до 65 %  $ZnO$ . Твердость 5 (самая высокая в группе кальцита). Плотность 4,1–4,5 г/см<sup>3</sup>. Трудно диагностировать.



В больших массах – руда на цинк. Цинка в смитсоните может быть больше, чем в первичных сфалеритах, из которых он выносятся.

Месторождения: Турланское в хребте Кара-Тау (Казахстан), крупнейшее месторождение Ледвилл в Колорадо (США), которое разрабатывалось 30 лет как чисто свинцовое и только потом были найдены богатые смитсонитовые руды (настолько мало они приметны среди известняков и других пород).

☉ **Доломит  $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$** . Двойная соль кальция и магния с изоморфной примесью железа, вплоть до образования минерала состава  $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$ . Встречается в виде ромбоэдрических, иногда седлообразно искривленных кристаллов и сплошных зернистых масс. Цвет белый, коричневатый-серый, ржавый. Твердость 4. Плотность 1,8–2,9 г/см<sup>3</sup>. Спайность и блеск как у кальцита. Тригональный.

Образуется в средне- и низкотемпературных гидротермальных месторождениях, в осадочных толщах в водных соленосных бассейнах в ассоциации с гипсом, ангидритом и солями (первичный, редко). Может также образовываться в процессе замещения (доломитизации) осадков, поздней эпигенетической перекристаллизации магниезиального кальцита.

Доломитовые породы используются как флюс, огнеупорный материал, строительный камень и в сельском хозяйстве для известкования кислых почв.

Узнается с трудом. Даже при большом навыке визуально его не отличить от кальцита, магнетита, сидерита.

☉ **Церуссит  $\text{PbCO}_3$** . «Церусса» по-латыни – белила. Синоним: белая свинцовая руда. Вторичный минерал зоны окисления свинцовых сульфидных руд. Образует тонкозернистые, плотные, тяжелые массы серого, полосчато-серого цвета, а также встречается в виде отдельных кристаллов и их двойниковых сростков. Кристаллы полупрозрачные, серовато-белые с алмазным блеском на гранях и жирным в изломе. Ромбический. Твердость 3–3,5. Очень высокая плотность 6,4–6,6 г/см<sup>3</sup>. Часто наблюдается в ассоциации с галенитом, лимонитом (от последнего неотличим, т. к. окрашивается в бурый цвет; забойщики отличают церуссит в лимоните по характерному хрустящему или скрипящему звуку, который возникает при разламывании). Руда на свинец. Содержание  $\text{PbO}$  до 84 %.

Диагностические признаки: характерен алмазный блеск и высокая плотность.

Месторождения: в Казахстане (хр. Кара-Тау – Турланское), Нерчинский район (Забайкалье – Тайнинское, Кадаинское), Алтай (Риддерское, Зыряновское и др.) – встречаются прекрасно образованные кристаллы.

☉ **Арагонит  $\text{CaCO}_3$** . Назван по месту Арагония (Испания), где был впервые установлен. Ромбический. Одиночные кристаллы таблитчатые или призматические, игольчатые. Встречаются двойники, тройники (шестиугольных очертаний). Встречается в виде натечных, шаровидных форм. Образуется при гидротермальных процессах в трещинках серпентинитов, пустотах базальтов, изредка в мраморах, отложениях из горячих минеральных источников в виде оолитов или известковых туфов («гороховый» или «икряной камень» карловарских источников в Чехии). Однако, чаще всего образуется при экзогенных процессах (в коре выветривания ультраосновных пород в ассоциации с доломитом, гипсом, глинистым веществом и др.). Образует «железные цветы» – спутанно-волоконистые образования белого цвета (известны в Бакальском месторождении Ю. Урала среди бурых железняков).

Цвет белый, желтовато-белый, фиолетовый и серый. Отдельные кристаллы часто прозрачны и бесцветны. Блеск стеклянный. Твердость 3,5–4. Плотность 2,9–3 г/см<sup>3</sup>. В соляной кислоте подобен кальциту. Отличается отсутствием спайности по ромбоэдру, повышенной твердостью и формой кристаллов.

Является одним из основных компонентов (наряду с кальцитом и органическим веществом – конхиалином) перламутра, жемчуга, костей ряда животных.

☉ **Малахит  $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$  и азурит  $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$** . Это безводные карбонаты меди. Минералы зоны окисления халькопирита и других сульфидов меди вблизи с мрамором.

рами. Малахит образует натечные, почковидные, радиально-лучистые, гроздьевидные агрегаты, пленки, примазки по трещинам и пустотам. Часто встречается в псевдоморфозах по самородной меди, куприту, азуриту. Цвет ярко-зеленый, в почковидных массах характерно чередование более темных зеленых и более светлых голубоватых зон. Блеск стеклянный, матовый и шелковистый. Твердость у малахита и азурита сходные 3,5–4, как и плотность 3,9–4 г/см<sup>3</sup>.

Используется как краска и как ценный (и теперь очень редкий в России) декоративный и поделочный камень. Входит в состав медных руд («медная зелень»). Азурит встречается вместе с малахитом в виде зернистых кристаллических агрегатов и потеков темно-синего и голубого цвета. Используется как синяя краска. Является компонентом медных руд. Оксида меди в малахите до 72 %, а в азурите до 70 %.

## ЛЕКЦИЯ 17

### Галогенные и прочие соединения

Общая характеристика галогенных соединений. Краткие сведения о минералах (флюорит, галит, сильвин, карналлит). Прочие соединения.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛОГЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

К типу галогенных соединений относится около 100 минералов. Это соли кислот HF, HCl, HBr, HI. Например, галит NaCl, виллиомит (NaF) и др. Состав этих веществ очень разнообразен. Имеются двойные и тройные соли типа K<sub>2</sub>PbCl<sub>4</sub> (псевдокотуннит), бывают минералы-кристаллогидраты, например, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O или оксигалогенные соединения типа Cu<sub>2</sub>Cl(OH)<sub>3</sub> (атакамит).

В структурном отношении галогенные соединения преимущественно ионные соединения, кристаллизующиеся чаще всего в кубической сингонии. Тип галогенных соединений разбит на пять классов – фториды, хлориды, бромиды, иодиды, оксигалогенные соединения. К фторидам относятся минералы группы виллеомита NaF и др., флюорита CaF<sub>2</sub> и др., криолита Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> и др., селлаита MgF<sub>2</sub> и др. Среди хлоридов выделяют группы нашатыря NH<sub>4</sub>Cl, галита (NaCl – галит, KCl – сильвин), хлораргирита AgCl и др., бишофита MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, атакамита Cu<sub>2</sub>Cl(OH)<sub>3</sub>, карналлита KMgCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O и др.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

☺ **Флюорит CaF<sub>2</sub>**. Иногда содержит изоморфные примеси редких земель (Ce, Y и др.). Сингония кубическая. Кристаллы в виде октаэдров, кубооктаэдров, кубов, от прозрачных до непрозрачных. Часто флюорит образует сростки, друзы, радиально-шестоватые, зернистые агрегаты, пленки по трещинам, вкрапления отдельных зерен. Цвет белый или чернильно-синий, зеленый, фиолетовый (от примесей редких земель, образующих центры окраски). Блеск на гранях стеклянный, в изломе и агрегатах жирный. Твердость эталонная – 4. Спайность совершенная по октаэдру, по четырем плоскостям. На сколах больших кристаллов часто видны трещины спайности, пересекающиеся под углами 60°.

Встречается в грейзенах и высокотемпературных гидротермальных месторождениях. Особо большие скопления, сплошные зернистые и радиально-лучистые агрегаты образуются в некоторых средне- и низкотемпературных гидротермальных месторождениях, откуда флюорит добывают в качестве флюса и сырья для химической промышленности. Известны месторождения крупных прозрачных однородных кристаллов флюорита в виде скоплений и друз в пустотах гранитных пегматитов. Такие кристаллы являются ценным оптическим сырьем.

Легко узнается по форме кристаллов, их разнообразной окраске, спайности. В отличие от кальцита у флюорита более жирный блеск (у радиально-лучистых агрегатов), т. е. более «мокрый» вид. Тонкозернистые фарфоровидные (халцедоновидные) массы белого флюорита отличаются от кварца по твердости.

☺ **Галит NaCl**. Сингония кубическая. Структура образована близкой к плотнейшей упаковке хлора (с натрием в октаэдрических пустотах). Кристаллы в виде кубов и кубо-октаэдров (прозрачные до полупрозрачных). Встречается на стенках промоин в соляных отложениях, на стенках соляных шахт, на стенках кратеров вулканов, в отложениях самосадочной соли. Обычно образует зернистые массивные и слоистые агрегаты, слагающие пропласты в осадочных породах. Цвет белый, иногда пятнами, чернильно-синий (за счет появления в кристаллах галита центров окраски при вхождении в позиции  $\text{Na}^+$  атомов  $\text{Na}^0$ ). Блеск стеклянный, жирный. Твердость 2. Совершенная спайность по кубу.

Является хемогенным осадком замкнутых заливов морей и озер (входит в состав эвапоритов). Такие осадочные горные породы называют каменной солью.

Кроме пищевой промышленности соль используют в химической (из нее получают соду, соляную кислоту, металлический натрий, едкий натр, хлор). Она широко применяется в металлургии, электротехнике.

☺ **Сильвин KCl**. Сингония кубическая. Кристаллы в виде куба. Встречается в составе соляных отложений в сплошных зернистых скоплениях грязно-бурого, красного цвета (за счет механических примесей). От галита отличается по горько-соленому вкусу. Образуется в тех же условиях, что и галит. При усыхании озер выпадает в осадок последним. Используется как сырье для получения калийных удобрений и различных калийных препаратов в медицине, фотографии, парфюмерии.

☺ **Карналлит  $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$** . Встречается в сплошных зернистых массах. Цвет белый. Бесцветный, иногда розовый. Очень гигроскопичен. Имеет особый горько-соленый вкус. Образуется в составе соляных осадочных пород. Является важной рудой на калий и магний и сырьем для калийных удобрений.

## ПРОЧИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Кроме рассмотренных типов химических соединений в мире минералов встречаются также редкие вещества, образующиеся в особых, экзотических геологических условиях. Это карбиды (их четыре – например, муассанит –  $\text{SiC}$ , когениит  $\text{Fe}_3\text{C}$ ), силициды (их два, например, феррисилицид  $\text{FeSi}$ ), нитриды – их семь, например, осборнит  $\text{TiN}$ , фосфида (их четыре, например, шрейберзит  $\text{Fe}_2\text{NiP}$ ), твердые углеводороды (их три, например, карпатит  $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ ) и органические соединения (их около 20).

Природные органические соединения кристаллической структуры образуются по трещинам в углях, торфах, песках и битуминозных сланцах, в составе гуано и др. гипергенных образованиях. По своей химической природе это, во-первых, соли щавелевой кислоты – оксалаты кальция, калия, железа, натрия, магния, алюминия, во-вторых, соли уксусной кислоты – ацетаты кальция, натрия, алюминия, в-третьих, азотистые органические соединения – урицит и др.