

А. Г. БУЛАХ, В. Г. КРИВОВИЧЕВ, А. А. ЗОЛОТАРЁВ

# ОБЩАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Учебник

*Рекомендовано*

*Учебно-методическим объединением по классическому  
университетскому образованию в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по специальности «Геология»*

4-е издание, переработанное и дополненное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2008

УДК 549(075.8)  
ББК 26.31я73  
Б907

Рецензенты:

академик РАН *Н. П. Юшкин* (Сыктывкарский государственный университет);  
доктор геолого-минералогических наук *А. А. Ульянов*  
(Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова)

**Булах А. Г.**

Б907      **Общая минералогия : учебник для студ. высш. учеб. заведений /**  
**А. Г. Булах, В. Г. Кривовичев, А. А. Золотарёв. — 4-е изд., перераб. и**  
**доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 416 с., [32] с. цв.**  
**ил. : ил.**

ISBN 978-5-7695-4681-5

В учебнике (3-е издание вышло в 2002 г.) изложены современные теоретические и прикладные аспекты минералогии. Приведены характеристика и внешние диагностические признаки главных породообразующих и рудных минералов. В настоящем издании номенклатура минералов дана в строгом соответствии с рекомендациями Международной минералогической ассоциации. С новейших позиций теории изоморфизма охарактеризованы закономерности вариаций химического состава минералов и взаимосвязи их кристаллохимических особенностей и свойств. Рассмотрены главнейшие типы минеральных месторождений, начала прикладной и поисковой минералогии и главные области промышленного использования минералов. Дан обзор методов минералогических исследований, используемых при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых.

Для студентов геолого-разведочных, нефтегазовых институтов, геологических факультетов университетов.

УДК 549(075.8)  
ББК 26.31я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Булах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарёв А. А., 2008  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-4681-5

*Посвящается нашему учителю профессору Александру Александровичу Кухаренко (1914–1996)*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

За основу настоящей книги взяты учебники А. Г. Булаха «Минералогия с основами кристаллографии» (1989) и «Общая минералогия» (1999, 2002). Учтен опыт многолетнего использования этих учебников в высших учебных заведениях страны, а также советы и замечания по методике изложения материала и теоретическим аспектам науки, поступившие от преподавателей институтов, классических и технических университетов разных городов и регионов России.

Книга рассчитана на студентов начальных семестров (2–3 или 3–4-го), поэтому изложение материала базируется на знаниях и терминах, которые студенты освоили в учебных курсах общей химии, физики, геологии и кристаллографии. Учтено, что главнейшие проблемы теории генезиса минералов преподаются, согласно учебным планам, в учебных курсах петрографии и петрологии, геологии и генезиса месторождений полезных ископаемых, метаморфизма, литологии, геохимии. В связи с этим в настоящем учебнике теория генетической минералогии представлена в краткой форме, которая минимально достаточна для описания минералов.

Вся номенклатура минералов дана в учебнике в строгом соответствии с рекомендациями Международной минералогической ассоциации. С новейших позиций теории изоморфизма охарактеризованы закономерности вариаций химического состава минералов и взаимосвязи их кристаллохимических особенностей и свойств, дана специальная характеристика объектов и явлений микро- и наномира минералов. В заключительном разделе рассмотрены важнейшие тенденции развития минералогии XXI века.

Главы учебника соотносятся с разделами учебной программы курса минералогии следующим образом: общая часть — это гл. 1, 2, 3, 4, 6, 8; генетическая часть — гл. 5, 7; описательная часть — гл. 8–20; заключительная часть — гл. 21, 22, 23. Авторы понимают, что методика преподавания минералогии неодинакова в разных вузах. Всеобщий учебник написать невозможно, так как творческий преподаватель всегда ведет свой предмет по-своему, поэтому текст учебника подан так, чтобы каждый профессор, доцент, ассистент всегда мог бы легко дополнить его своим оригинальным материалом, не ломая построение и содержание книги. В то же время авторы стремились изложить материал просто, без игры в латинизированную терминологию.

При подготовке учебника ценные замечания, советы и большую помощь авторы получили от своих коллег по кафедре минералогии Санкт-Петербургского государственного университета, а также от профессоров В. И. Павлишина, Е. Н. Котельниковой, С. В. Кривовичева, А. Р. Шахмурадяна. Цветные

фотографии предоставлены С. Ю. Янсон, Г. Ф. Анастасенко, А. И. Брусницыным, А. Г. Булахом, Д. В. Доливо-Добровольским, Н. И. Фришманом. Рисунки кристаллов и их агрегатов выполнены Д. В. Доливо-Добровольским и Г. Ю. Ивановым. Многие чертежи структур оригинальны, они даны по книге А. Г. Булаха, А. А. Золатарёва, В. Г. Кривовичева «Классификация, структуры, формулы минералов» (2003).

Замечания и пожелания просим направлять по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9. Университет, геологический факультет, кафедра минералогии.

# ОБЪЕКТ, ПРЕДМЕТ И ИСТОРИЯ МИНЕРАЛОГИИ

Из курса общей геологии известно, что горные породы и руды состоят из минералов. Например, минералы микроклин, альбит, кварц и биотит являются главными составными частями гранитов, гематит, магнетит — главными минералами некоторых железных руд.

Что же такое минерал и что изучает минералогия?

Любая наука находится в постоянном развитии, меняются ее цели, объекты, методы. Понятие «минерал» и содержание науки минералогии также меняются во времени. Поэтому одновременно существуют различные определения понятия «минерал», отвечающие разным подходам и тенденциям развития науки. К минералам относятся природные химические соединения кристаллической структуры, образовавшиеся в ходе геологических и геохимических процессов. Это, например, кварц  $\text{SiO}_2$ , микроклин  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , магнетит  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ . Их более 4000.

В учебнике мы дадим характеристику только главнейших пороодообразующих и рудных минералов.

Предметом исследования является минерал как природное химическое соединение. Физический объект непосредственного исследования — это его зерна, кристаллы, их агрегаты — т.е. те материальные тела, в виде которых минерал как химическое вещество кристаллической структуры существует в природе. Цель исследования — познать химическую и физическую обстановку образования данного по химическому составу вещества, выяснить физические условия зарождения и кинетику роста этих материальных тел, познать их внутреннее строение (например, дефекты, зоны и секторы разного состава), определить и понять их физические свойства (в том числе технические и другие ценные или вредные качества). Только исследование физических объектов природы — зерен, кристаллов и их агрегатов — даст минералогу возможность оценить качество руды или нерудного минерального сырья, понять и предсказать его поведение при добыче и последующей обработке.

Минералог должен знать минералы, уметь их искать и изучать.

Широкое содержание современной минералогии как науки показано В. И. Вернадским еще на рубеже XIX и XX вв. Минералогия как одна из главнейших в цикле геолого-минералогических наук предстает в учебниках П. Ниггли (1924, 1927), Н. М. Федоровского (1930), А. К. Болдырева и др. (1936), А. Г. Бетехтина (1956), Е. К. Лазаренко (1971). В России и бывшем СССР ми-

нералогия во всем своем объеме продемонстрирована в научных монографиях В. Ф. Барабанова, Г. П. Барсанова, А. Г. Бетехтина, К. А. Власова, В. И. Герасимовского, А. И. Гинзбурга, М. Н. Годлевского, Д. П. Григорьева, А. А. Кухаренко, Е. К. Лазаренко, А. С. Марфунина, В. И. Павлишина, Д. В. Рундквиста, С. С. Смирнова, В. С. Соболева, А. С. Уклонского, Н. М. Федоровского, А. Е. Ферсмана, Н. П. Юшкина.

Практическое значение минералогии как науки о минералах, умение их искать и использовать несомненно. Оно было велико всегда и являлось одной из основ материального развития общества.

## Предыстория минералогии

Знания о минералах, условиях их нахождения и представления об их происхождении накапливались человеком с древних времен. Орудия труда, строительные материалы, гончарное дело, рождение металлургии, соляной промысел, краски, скульптурный камень, украшения, врачевание — все это связано с использованием минералов и минеральных агрегатов — горных пород и руд. Постепенно накапливались те знания, которые много позже вошли в современную минералогию. Этот долгий этап предыстории минералогии Д. П. Григорьев образно назвал камневедением и рудоведением\*.

Человек каменного века познал самородную медь как прочный ковкий материал, затем обратил внимание на малахит и стал извлекать из него этот же металл, потом в ход пошли медные сульфидные руды, возникла первобытная металлургия. В каких-то из руд оказался касситерит — началось получение нового металлического материала, известного нам как бронза. Наступила новая эпоха в развитии цивилизации.

В числе камней святого Иерусалима в Библии названы берилл, хризопраз, халцедон, сапфир, изумруд, рубин, топаз — так мы сейчас трактуем старые термины Священного писания. А. К. Болдырев привел в 1944 г. список 77 камней, известных людям каменного века, жителям районов древней Месопотамии, Индии, Египта, Персии, Греции, Китая. Некоторые из этих камней, видимо, близко соответствуют минералам в нынешнем их понимании. Например, таковы указания на кварц и горный хрусталь, кальцит, галенит, магнетит, аметист, халькопирит, касситерит, малахит, азурит, топаз, хризолит, сапфир, молибденит, гипс, шпинель.

В трудах Аристотеля (384 — 322 гг. до н.э.) и Теофраста (ок. 372 — ок. 287 гг. до н.э.) сделано разделение между камнями и рудами. Позднее римский натуралист и историк Плиний Старший (23 или 24 — 79 гг.) написал четыре трактата о камнях, но в них верные наблюдения переплетаются с вымыслом и фантазией. В этих описаниях фигурируют термины, которые мы можем считать в какой-то мере правильными указаниями на минералы в современной их трактовке.

Хорезмский ученый-энциклопедист Абу Рейхан Мухаммед ибн Ахмед аль-Бируни (973 — 1048) в «Книге сводок для познания драгоценностей» привел

\* Д. П. Григорьев. Рассуждения о минералогии. — Сыктывкар: Геоприн, 1998. — 88 с.

подробные сведения (значения твердости, первые измерения удельного веса, местонахождения в Средней Азии, поисковые признаки) более чем о 50 минералах (в современном прочтении и толковании его терминов), рудах, металлах, сплавах. Таджикский естествоиспытатель, врач, математик, поэт и мыслитель Ибн-Сина, или Авиценна, (980 — 1037) дал их первую после Теофраста классификацию. Он разделил их на четыре группы — камни, горючие тела, соли, и металлы.

## Начало формирования собственно минералогии

Первым свидетельством формирования минералогии как самостоятельной науки являются работы немецкого врача, металлурга и естествоиспытателя Георга Бауэра, или Агриколы, (1494 — 1555) «О природе ископаемых», «О горном деле и металлургии», «О происхождении минералов». В трудах Агриколы впервые четко разделены минералы и горные породы. Среди первых выделены земли (старинное название оксидов), соли, драгоценные камни, металлы и «прочие» минералы, особое внимание при характеристике минералов уделено их формам и диагностическим признакам — цвету, блеску, спайности, твердости и др. Хорошее описание свойств минералов было опубликовано в ту же пору, в 1502 г., Леонардо да Винчи. В лапидарии (книге о камнях) венецианского физика Камилла Леонарда «Зеркало камней» (1502) содержится описание 279 минералов и минеральных веществ. Однако эти сведения все еще являются лишь частью общей науки о горах, рудах, камнях и металлах.

Термин «минерал» происходит от латинского слова *minera* — рудный штуф, кусок руды. В XIII в. его использует, например, немецкий философ Альберт Великий в своем научном трактате «О металлах и минералах» («*De Rebus Metallicis Et Mineralibus*»). Термин «минералогия» впервые был употреблен в 1636 г. итальянским ученым Бернардом Цезием (Цезиусом) применительно к науке о полезных ископаемых. Минералом назывались камни, фоссилии древних животных, нефти, смолы. Среди камней, естественно, были и минералы в нашем понимании этого слова. Оформление представлений о минералах в самостоятельную отрасль знания произошло значительно позднее.

Постепенное накопление знаний о фактических минералах было тесно связано с развитием методов аналитической химии. В 1735 г. шведский химик Георг Брандт при исследовании загадки обычной на вид руды, из которой почему-то не выплавляется металл, выделил в чистом виде новый элемент — кобальт (раньше были известны только его соединения). В 1751 г. шведский химик Аксель Кронстедт (1722 — 1765) впервые открыл в рудах, считавшихся по их цвету медными, никель (в составе минерала-арсенида никеля, как оказалось, главного в этих рудах). Другой шведский химик Карл Шееле (1742 — 1786) в 1778 г. при изучении минерала молибденита  $\text{MoS}_2$  получил триоксид молибдена и открыл этот химический элемент, а в 1781 г. в минерале тунгстите (оксиде вольфрама) он же обнаружил еще один новый химический элемент — вольфрам. Ясно, что эти открытия были не только успехами химии, ими вскрывалась и химическая природа самих минералов.

## Минералогия в XIX веке

Оформление минералогии как самостоятельной науки с современным ее содержанием и с современной трактовкой понятия минерал было обусловлено развитием горнорудной промышленности. Глубокий след оставили на рубеже XVIII и XIX вв. работы А. Вернера и В. М. Севергина.

А. Вернер (1750—1817) учился во Фрейбергской горной академии, только что созданной в центре горнорудной промышленности Средней Европы. Затем он работал в этой академии и обобщал и систематизировал громадный материал, накопленный горняками и натуралистами. А. Вернер составил сводку внешних признаков минералов — их окраски, общего вида (облика, поверхности, блеска), внутреннего вида (излома, формы обломков), прозрачности, цвета черты, побежалости, твердости, запаха, вкуса и т. д. А. Вернер стремился связать свойства минералов с их генезисом и ростом кристаллов. Он выделил химическую, географическую и экономическую минералогия. Выполненные им подробные описания минералов продолжительное время считались классическими.

Русский химик и минералог В. М. Севергин (1765—1826) в своих минералогических работах и, прежде всего, в капитальном двухтомном труде «Первые основания минералогии» особое внимание уделял условиям образования минералов. Он писал: «Минералогия есть часть естественной истории, которая научает нас познавать ископаемые тела, т. е. отличать оные от всех других тел по существенным их признакам, знать их свойства, месторождения, пользу и отношение их как между собой, так и к другим телам».

Минералы, по мнению В. М. Севергина, образуются в природе не изолированно, не случайно, а определенными сообществами; совместное нахождение минералов в таких сообществах в месторождениях он называл «смежностью». В. М. Севергин продолжает здесь научные традиции М. В. Ломоносова, видя в изучении минеральных сообществ не только путь к выяснению условий образования минералов, но и основу для научных поисковых прогнозов.

В качестве одной из задач минералогии В. М. Севергин, как и А. Вернер, выдвинул изучение практической ценности минералов, выделив «экономическую» минералогия.

В минералогической классификации он выступает сторонником химического направления. Ему же принадлежит первая попытка осуществления идей М. В. Ломоносова о создании региональной минералогии — в виде двухтомной сводки «Опыт минералогического землеописания Российского государства». Значение ее, по мнению В. М. Севергина, заключается в том, что «познав, какие в каждой стране находятся минералы, побуждаться будем употреблять их в настоящую пользу; сверх того не будем заимствовать из отдельных мест и притом с издержками и затруднениями то, что вблизи нас в недрах земли скрывается».

Работы А. Вернера и В. М. Севергина легли в основу всех направлений дальнейшего развития минералогии в XIX в. Шло упрочение представлений о минерале как химическом соединении (Р. Гаюи, Й. Берцелиус, Э. Митчерлих, Д. И. Соколов, Г. Розе, П. Грот, Г. Чермак и др.), изучались кристаллы мине-



ралов (работы Н. И. Кокшарова, П. В. Еремеева, П. Грота), формировались представления о их внутреннем дискретном строении (работы О. Бравэ, Е. С. Федорова, А. Шенфлиса и др.). Обширны и результативны были в XIX в. также исследования физических свойств минералов — оптических (Г. Сорби, Ф. Циркель, Г. Розенбуш, А. А. Иностранцев, А. П. Карпинский), плотности (Л. И. Панснер, А. Брейтгаупт), твердости (Ф. Мосс) и др.

В XIX в. шло интенсивное накопление фактического материала по минералогии месторождений в пределах отдельных стран и географических районов. В России это направление минералогии, названное А. Вернером и В. М. Севергиным географической минералогией, нашло свое отражение прежде всего в работе самого В. М. Севергина «Опыт минералогического землеописания Российского государства» (1809) и в 11-томном труде Н. И. Кокшарова (1818—1893) «Материалы для минералогии России» (1852—1892).

К числу таких же работ относятся книги разных лет по минералогии Великобритании и Ирландии, США, Нового Уэльса, Перу, Японии, Франции, Испании и других стран.

В XIX в. свыше 150 ученых работало в области синтеза минералов и моделирования природных процессов их образования. До настоящего времени сохранили свою ценность опыты Я. Вант-Гоффа, выполненные им в 1897—1904 гг., по кристаллизации хлоридов и сульфатов из водных растворов и по порядку выделения этих минералов при усыхании морских лагун. Также ценны результаты изучения металлургических шлаков И. Фогтом в 1888—1903 гг., показавшего, как порядок кристаллизации минералов из расплава зависит от его состава.

## Развитие минералогии в XX веке

В целом успехи химии и ее роль в развитии минералогии к концу XIX в. настолько возросли, что вступление минералогии на рубеж XIX—XX в. в ее новый, современный этап развития ознаменовалось зарождением в ней новой науки — геохимии, а сама минералогия нередко стала толковаться как химия земных процессов. В этом большую роль сыграла деятельность выдающихся русских минералогов В. И. Вернадского (1863—1945) и А. Е. Ферсмана (1883—1945).

Академик В. И. Вернадский широко известен как реформатор минералогической науки, основоположник современной генетической минералогии и один из создателей геохимии. В. И. Вернадский определял минералогию как историю минералов земной коры и как химию земных процессов. Он придавал важнейшее значение исследованию процессов образования минералов и их закономерных ассоциаций (парагенезисов), изучению зависимости этих процессов от геологической обстановки. Большое внимание В. И. Вернадский уделял вопросам химической конституции минералов, видя в ней основу естественной классификации природных соединений. Для важнейшего в земной коре класса соединений силикатов он создал общую теорию химического строения, убедительно доказав одинаковую химическую роль кремния

и алюминия в этой категории минералов. Эта теория, появившаяся в результате обобщения огромного фактического материала, была в свое время триумфом научной мысли, победившей ложные представления о том, что все силикаты, якобы, являются солями разных кремниевых кислот. Еще одним вкладом в минералогию явилось дальнейшее развитие представлений об изоморфизме — вывод схем вхождения химических примесей в минералы в разных геологических условиях.

Немецкий ученый В. Гольдшмидт (1853—1933) внес громадный вклад в изучение морфологии кристаллов, он не только создал девятитомную сводку по всем минералам — «Атлас кристаллических форм», но выдвинул и развил идею о том, что по форме кристалла, скульптуре граней, деталям строения поверхности можно судить о его прошлом. Норвежец В. М. Гольдшмидт (1888—1947) развил химическую минералогию. Он использовал правило фаз для объяснения закономерностей некоторых физико-химических процессов контактного метаморфизма и образования роговиков разного минерального состава, разработал существующую до сих пор систему размеров атомов и ионов в кристаллических структурах минералов. После В. М. Гольдшмидта сочетание физико-химического и геологического подхода к исследованию генезиса минералов и их месторождений стало типичным для работ XX в.

А. Е. Ферсман положил начало учению о типоморфизме минералов — зависимости морфологии, состава, свойств минерала и набора его минералов-спутников от условий образования. Это направление исследований плодотворно развито плеядой московских минералогов — А. И. Гинзбурга, Ф. В. Чухрова, Н. В. Петровской. А. Е. Ферсман развил идею о том, что последовательность образования минералов в месторождениях связана с энергетикой процесса, предложил метод приближенного расчета энергий кристаллических решеток минералов, изложил одну из первых теорий о природе окраски минералов, углубил учение об изоморфизме. Велики заслуги А. Е. Ферсмана в развитии регионально-минералогических исследований и в освоении природных ресурсов страны.

Д. П. Григорьев (1909—2003) развил особое направление исследований — познание закономерностей зарождения, роста и последующего преобразования минералов и их агрегатов. Он объединил эти явления и само учение о них под названием «онтогенез минералов». Оно развито в работах Н. П. Юшкина, В. И. Павлишина, А. Г. Жабина, Ю. М. Дымкова и др.

Плеяда физиков, химиков, кристаллографов (В. Брэгг — отец, В. Брэгг — сын, Л. Полинг, Ф. Махачки, В. Тэйлор, Н. В. Белов, Х. Ритвельд и др.) создала мощное направление в минералогии — расшифровку кристаллических структур минералов. В России центрами структурной минералогии стали Институт кристаллографии РАН, Московский государственный университет, позднее Санкт-Петербургский государственный университет.

В XX в. получили большое развитие исследования в области физики минералов, природы их свойств и в особенности физических явлений, обуславливающих окраску минералов (основополагающие работы отечественных исследователей Г. П. Барсанова, Л. В. Бершова, С. М. Грумм-Гржимайло, А. С. Мар-

фунина, В. М. Винокурова, Г. И. Россмана, А. Н. Платонова и др.). Экспериментальная минералогия активно развивается во многих научных центрах мира, в России формировались специальные лаборатории и институты в Москве, Черногловке, Александрове и Новосибирске.

## Понятие «минерал» в других науках

В 1675 г. французский химик и врач, член Парижской академии наук Н. Лемери в своем курсе «Общей химии» разделил все вещества на растительные, животные и минеральные. Минералами им были названы неорганические вещества. Н. Лемери отнес к ним, во-первых, собственно минералы (по современному их смыслу в минералогии), а также камни, руды и т. п. природные образования. Во-вторых, он назвал минералами химические элементы в любой форме их нахождения в тканях растений и животных, в любых других веществах и материалах.

В 1820—1830-х гг. Й. Берцелиус, подобно Н. Лемери, противопоставил друг другу химию органическую и минеральную. Именно как отражение такого деления химических веществ сложился разный смысл термина «минерал» в современных науках. В геологических науках, физике, химии, географии, астрономии и в таких прикладных областях деятельности человека, как добыча и обработка полезных ископаемых, металлургия, синтез драгоценных камней, минерал трактуется так же, как в минералогии.

Термин «минерал» имеет иной смысл и неоправданно используется сейчас в своем старом значении в биологии, физиологии, ботанике, медицине, фармакологии. В них к минералам относят металлы, например Ca или Zn, в какой-либо форме находящиеся в крови человека или в его мягких тканях. Минералами называют «фтор» и другие «микроэлементы» в составе различных лекарств или даже зубной пасты. Также минералами называют в фармакологии неорганические вещества — компоненты лекарств. В «Перечне жизненно необходимых и важнейших лекарственных средств» в распоряжении Правительства РФ от 29 марта 2007 г. имеется раздел XX — «Витамины и минералы». В нем минералами названы аскорбиновая кислота, аспарагинат калия и магния, йодид калия, эргокальциферол.

Равноправное сосуществование старого и современного толкования термина «минерал» косвенно провоцирует появление громадной литературы об удивительных и эффективных лечебных свойствах минералов. Несведущие читатели попадают в капкан разночтения термина «минерал» в медицине и минералогии. Лишь малая доля из числа фактических минералов реально входит в состав медицинских лекарств и препаратов.

Также двусмыслен термин «минеральные» удобрения. Они состоят из искусственно полученных химических веществ, и таким их наименованием они противопоставляются органическим удобрениям. К такой же старой традиции деления химических веществ восходит понятие «минеральные лечебные воды» — в их составе нет минералов, но они содержат в себе компоненты минерального происхождения. Точно так же термин «минеральные краски»

вовсе не означает, что они обязательно приготовлены на основе природных минералов. Его смысл, пришедший к нам из прошлого, заключается в том, что в отличие от растительных и животных красок минеральные краски состоят из пигментов неорганического происхождения. Ими могут быть в равной мере как собственно минералы, так и искусственные химические вещества. В этом смысле название для краски «киноварная красная» вовсе не означает, что в наши дни она обязательно изготовлена на основе природной киновари.

# КОНСТИТУЦИЯ МИНЕРАЛОВ

Каждый минерал характеризуется своей конституцией — только ему присущим определенным единством кристаллической структуры и химического состава. Конституция минерала, по определению Д.П.Григорьева, это его сущность как природного химического соединения. Вещества одного и того же состава, но разной структуры имеют свою конституцию. В физике и химии мы относим их к разным полиморфным модификациям, в минералогии считаем разными минералами. Так, например, алмаз и графит состоят из углерода, но имеют разную структуру. Это два различных минерала. Другие минералы могут иметь одинаковую кристаллическую структуру, но разный химический состав, например гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и корунд  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , касситерит  $\text{SnO}_2$  и рутил  $\text{TiO}_2$ . Такие соединения называются изоструктурными.

## Принцип плотнейшей упаковки

Для объяснения природы кристаллических структур веществ в кристаллографии используется принцип плотнейшей упаковки атомов и ионов в кристаллах. Согласно ему принимается, что, во-первых, форма всех атомов и ионов сферическая и, во-вторых, весь объем кристалла или отдельных его структурных блоков заполнен плотно соприкасающимися атомами и ионами. На основе этого принципа удалось просто и геометрически образно охарактеризовать первые расшифрованные структуры самородных металлов, некоторых относительно простых по составу оксидов, сульфидов, силикатов.

Рассмотрим для начала возможные способы плотнейшей укладки шаров равного диаметра. Положим друг на друга два слоя плотно соприкасающихся шаров, обозначив нижний слой буквой *A*, верхний — буквой *B*. Третий слой можно положить на слой *B* по-разному: в одном случае шары третьего слоя точно повторяют положение шаров в слое *A*, а в другом — шары третьего слоя займут неповторяемую позицию *C*, их затем можно перекрыть четвертым слоем шаров, который повторит положение слоя *A*. Упаковка первого типа характеризуется повторяемостью *AB AB AB...*, ее называют двухслойной (а по характеру симметрии — гексагональной) (рис. 1). Для упаковок второго типа характерна повторяемость *ABC ABC ABC...*, ее называют трехслойной (кубической) (рис. 2). Их сравнение дано на рис. 3.

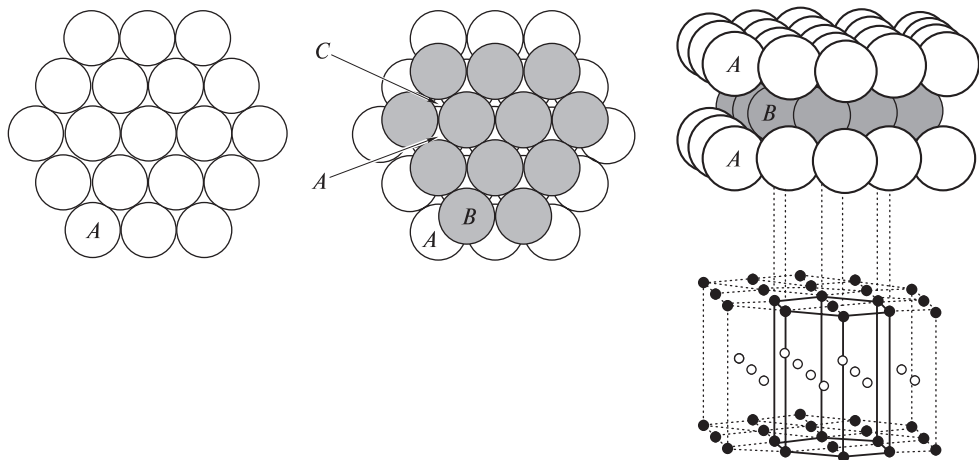


Рис. 1. Сопоставление модели гексагональной (двухслойной) плотнейшей упаковки и кристаллической решеткой той же симметрии

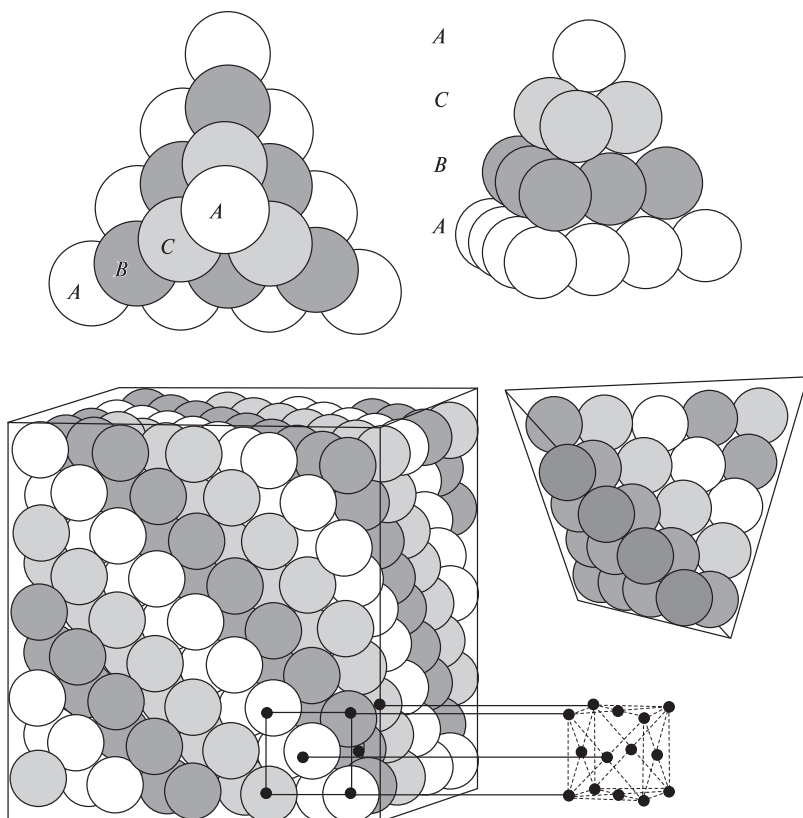


Рис. 2. Сопоставление модели кубической (трехслойной) плотнейшей упаковки и кристаллической решеткой той же симметрии

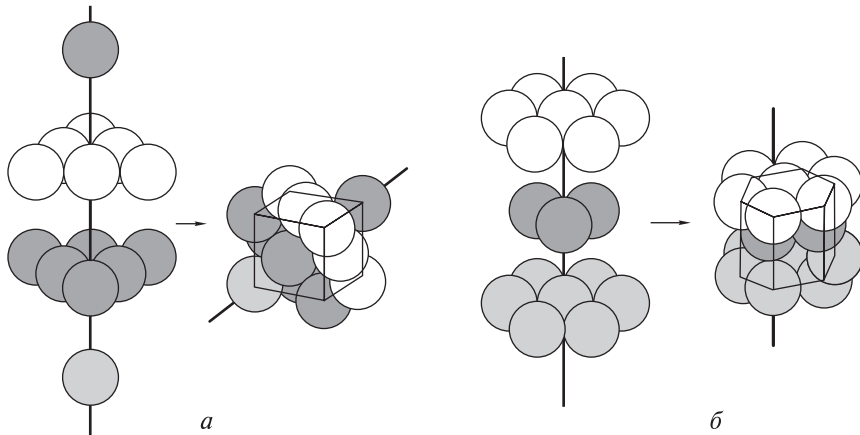


Рис. 3. Элементарные ячейки в структурах с кубической (а) и гексагональной (б) плотнейшей упаковкой

Плотно уложенные шары занимают лишь 74,05 % заполняемого ими объема, а 25,95 % приходится на пустоты между шарами. Их два типа. Если сверху пустота прикрывается шаром следующего слоя, она оказывается окруженной четырьмя шарами. При соединении центров шаров получится тетраэдр, а саму пустоту называют поэтому тетраэдрической. Когда пустота прикрывается сверху не одним, а тремя шарами, повернутыми относительно шаров первого слоя на  $60^\circ$ , она находится между шестью шарами, и ее называют октаэдрической.

В корунде  $\text{Al}_2\text{O}_3$  основу его структуры составляет плотнейшая гексагональная упаковка ионов кислорода. Катионы алюминия  $\text{Al}^{3+}$  занимают октаэдрические пустоты. Они заполняют только  $2/3$  от общего числа этих позиций.

Можно подсчитать, что если общее число шаров, образующих плотнейшую упаковку, принять за  $n$ , то число октаэдрических пустот будет равно тоже  $n$ , а тетраэдрических —  $2n$ . Такому соотношению соответствует, например, состав шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , структура которой описывается по модели кубической плотнейшей упаковки ионов кислорода. Катионы Mg и Al располагаются в ее пустотах.

## Координационное число

Координационным числом данного атома в структуре минерала называется число ближайших от него соседних атомов. Любой шар в плотнейшей упаковке имеет координационное число 12: шесть соседних шаров располагаются в том же уровне, три — наверху, три — внизу. Атомы, находящиеся в тетраэдрических пустотах, имеют четверную координацию, координационное число атомов в октаэдрических пустотах — 6.