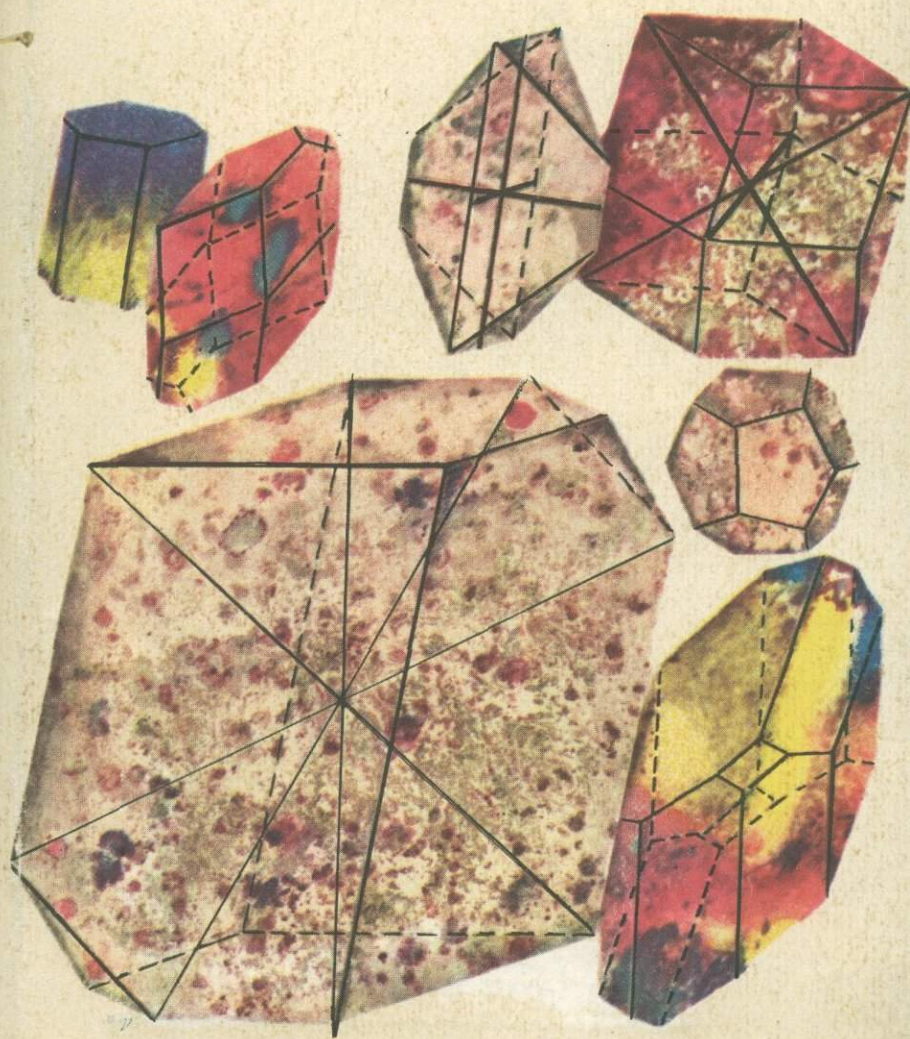


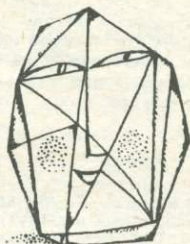
# МИНЕРАЛ РАССКАЗЫВАЕТ О СЕБЕ

**Б.З. КАНТОР**



**Б.З. КАНТОР**

# МИНЕРАЛ РАССКАЗЫВАЕТ О СЕБЕ



МОСКВА „НЕДРА“ 1985



4663

УДК 548  
ББК 26.303  
552

**Кантор Б. З.**

К-19 Минерал рассказывает о себе. — М.: Недра, 1985. — 135 с., ил. 60.

*В популярной форме изложены основные вопросы морфологии минералов и образования природных кристаллов. Даны начальные понятия кристаллографии и необходимые сведения о кристаллографических формах минералов. Описаны зарождение и рост природных кристаллов. Охарактеризованы минеральные индивиды и агрегаты, их возникновение, рост и развитие в зависимости от условий кристаллизации. Освещены методы и значение изучения различных минеральных форм. На примере наиболее известных минералов показано, как форма кристаллов и их особенности позволяют расшифровать условия формирования минералов.*

Для широкого круга читателей, интересующихся природными камнями.

Рецензент — Д. А. Минеев, д-р геол.-минер. наук (Московский геологоразведочный институт)

К  $\frac{1904020000-450}{043[01]-85}$  37—85

ББК 26.303  
552

И в небе, и в земле сокрыто  
больше,  
чем снится вашей мудрости,  
Горацио.

В. Шекспир, «Гамлет», акт I

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Разве могут рассказать о себе минералы — холодные, бездушные камни? — Конечно! И вы можете убедиться в этом сами. Надо только как следует подготовиться, иначе рассказ будет непонятен, и от встречи с минералами вместо яркого переживания останется смутное чувство, что вы прошли мимо чего-то интересного и важного. Познакомьтесь с минералами поближе: к вашим услугам книги и музеи, коллекции и фотографии. И уж тогда отправляйтесь в горы или на обрывистый берег речки, в овраг, старую закопушку — один из тех заветных уголков, о каких всегда мечтает любитель минералов и где, робея перед матушкой-природой, он всякий раз ждет и непременно дождетсч чуда.

Сегодня мы здесь в гостях. Тяжелую кувалду, объемистый рюкзак оставим где-нибудь в укромном месте, отправимся налегке, и лишь ловко сработанный молоток, давний и верный спутник, весело позвякивает по камням.

В нагромождении невзрачных каменных глыб неуловимо выделялась одна. Точный удар — и вот оно, чудо. Среди однообразной землистой массы чистыми сочными красками засверкали четкие грани кристаллов.

Как и почему они стали такими?

На заре цивилизации человек заметил красоту природы, уже тогда он начал задавать ей вопросы. И природа отвечала... Но глухи, невнятны были эти ответы. С тех пор человек все время учится понимать язык природы. Он учится быть Исследователем.

Если вы любознательны, не совсем забыли школьные уроки физики, химии и геометрии, и главное — если вы любите минералы и интересуетесь ими, — прочтите эту книгу. Вы узнаете, что могут рассказать минералы о том, как они появились на свет, как и почему стали такими, какие они есть.

Записать эти рассказы помогли автору В. И. Степанов и И. Г. Павловская, а В. В. Веселовский снабдил их фотоиллюстрациями. Автор выражает им свою глубокую признательность.

# О МИНЕРАЛАХ: КЛАССЫ И ИЕРАРХИИ



Давайте знакомиться с главным действующим лицом повествования: «...минералом называют химически и физически индивидуализированный неорганический продукт природной физико-химической реакции, находящийся в кристаллическом состоянии...» (А. А. Годовиков. Минералогия. М., «Недра», 1983, с. 8).

Это центральное определение минералогии заслуживает подробного рассмотрения. В нем, во-первых, подчеркивается, что к минералам относятся только индивидуальные химические вещества, но не механические смеси. Минерал индивидуализирован и физически: это конкретное физическое тело, обладающее своими физическими свойствами и внешним обликом. Притом к минералам могут быть отнесены только тела кристаллической природы — с упорядоченным внутренним строением. Не следует расценивать это как некое исключительное качество. Наоборот, минералы — типичные твердые тела: кристаллическое состояние для таких тел закономерно и свойственно подавляющему их большинству. Наконец, в определении обращено внимание на способ возникновения минерала — только естественным путем, без вмешательства человека. Следовательно, нельзя считать минералами вещества неприродного происхождения — «синтетические» кварц и корунд, искусственные ювелирные камни и другие технологические продукты, даже если они химически индивидуальны и имеют кристаллическое строение.

Разнообразие минералов всегда поражает, и мы даже начинаем думать, что их бесконечное множество. Но понастоящему разных минералов не так уж много, во всяком случае, гораздо меньше, чем искусственных веществ. Многоликость минералов долгое время сбивала с толку даже специалистов. Прошли столетия, прежде чем появились способы надежно различать минералы и отличать их от неминералов. С тех пор минералогии бдительно следят за порядком в своем реестре и безжалостно исключают из него все, что не подходит под строгое определение минерала\*.

\* Корректировка и упорядочение исторически сложившейся номенклатуры минералов — одна из задач Международной минералогической ассоциации (основана в 1958 г.).

Но, как давно замечено, ввести определение куда проще, чем применять его на практике. И дело не только в технических трудностях. Природа сложна, рамки научного термина ей порой узковаты. Все неорганические продукты природных реакций — химические вещества; какие же из них не являются минералами? Логично исключить жидкости и газы: они не обладают кристаллическим строением. А как быть с самородной ртутью? Это индивидуальное химическое вещество; оно образуется при определенных геологических процессах, встречается в земной коре в характерной обстановке (правда, не совсем такой, как в фантастическом рассказе И. А. Ефремова «Озеро горных духов») и отвечает всем общепринятым представлениям о минералах, кроме одного: при обычной температуре это жидкость. Некоторые твердые природные вещества, как обыкновенный опал, традиционно считающиеся минералами, тоже, как выяснилось, не имеют кристаллического строения. Но таких веществ набирается немного, и пока удобнее сделать для них исключение, оставив в списках минералов. Однако нет смысла делать такое исключение для воздуха, природных вод, нефти, горных пород, окаменелостей: по целому ряду специфических качеств целесообразно выделить их в отдельные категории природных объектов. Кроме того, это смеси. Горная порода, например, — это чаще всего смесь минералов, сама по себе не представляющая самостоятельного минерала. Так что мы не будем относить к ним гранит, яшму, известняк, хотя они состоят из минералов.

Надо заметить, что само понятие «вещество», даже природное и кристаллическое, отнюдь не тождественно понятию «минерал». Галит (каменная соль) — минерал. Он состоит из вещества, которое химик называет «хлоридом натрия», подразумевая некую совокупность химических свойств — способность к определенным химическим реакциям. То же самое вещество в быту известно как «поваренная соль». Это нечто белое, порошковатое, а главное — соленое. Остальное не имеет значения. Минерал галит — понятие более сложное: это природные кристаллы с химическими свойствами хлорида натрия, с набором конкретных физических свойств (твердость, цвет, преломление света, электрическое сопротивление и др.), встречаемые в определенных месторождениях, в определенных сочетаниях с другими минералами, пригодные для соления пищи и некоторых других целей и т. д. Особенно интересна способность минералов приобретать ту или иную характерную внешнюю форму. Она и будет главным предметом нашего обсуждения.

Совокупность минералов одинаковой кристаллической структуры и одинакового, в пределах допускаемых отклонений, химического состава образует минеральный вид. Современная минералогическая систематика насчитывает свыше

2800 минеральных видов. Под разновидностями понимают минералы, отличающиеся деталями состава и (или) отдельными свойствами — окраской, формой выделения и др. Так, аметист, цитрин и морион — цветные разновидности кварца; аквамарин и изумруд — разновидности берилла, отличающиеся окраской и химическими примесями; селенит — волокнистая разновидность гипса. Минеральный вид — понятие более широкое, чем разновидность: всякий изумруд — это берилл, но далеко не всякий берилл — изумруд.

## АЗЫ МОРФОЛОГИИ

### Сословия минералов

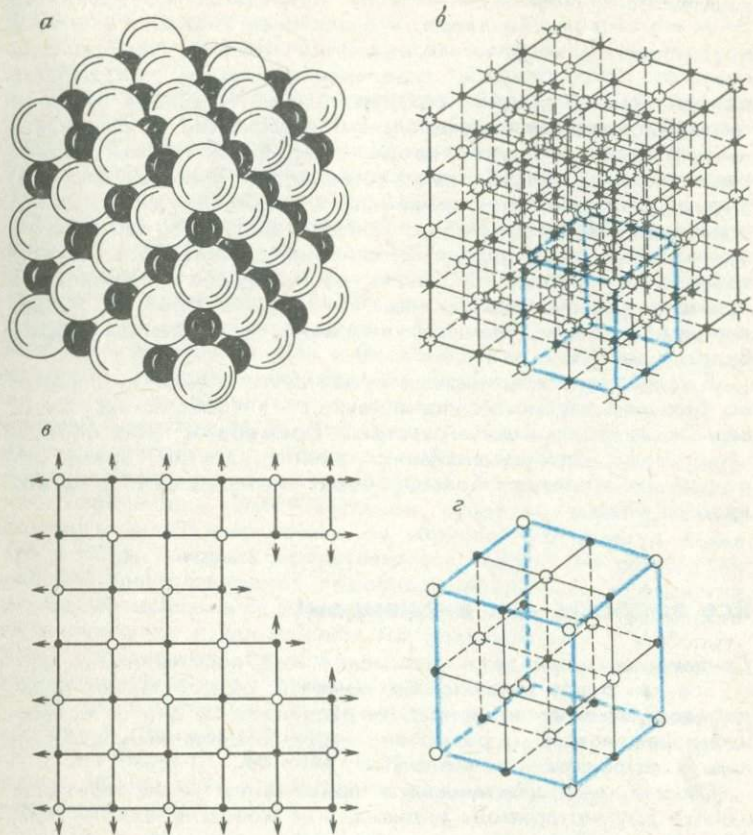
Основная масса минералов входит в состав горных пород, в которых они заключены в виде зерен разной величины и более или менее случайной, обычно неправильной формы.

Лишь очень небольшая часть минералов находится в «свободных» условиях, позволивших им принять ту красивую внешность, которая так привлекает собирателей. Это — кристаллы, обладающие «собственной», специфической для каждого минерального вида естественной внешней огранкой. В кристалле минерал предстает перед нами в наиболее совершенном виде; совершенство же пробуждает чувство прекрасного. Правда, если быть совсем точным, на форму кристалла оказывает влияние и обстановка, в которой он возник и существует, что и побудило нас взять слово «собственной» в кавычки.

Если угодно, можно считать, что среди минералов царит своего рода «сословная иерархия»: огромному большинству суждено вести принужденный образ жизни, и лишь немногим выпал жребий «патрициев». Правда, представлены они теми же минеральными видами. В царстве минералов сословные различия относительны, как и в человеческом обществе.

### Что есть что!

Напомним, что кристаллическими называются тела с упорядоченным внутренним строением на уровне атомов или молекул. Если бы кристаллическое вещество можно было рассмотреть при сверхувеличении примерно в миллиард раз (сегодня этой возможности мы еще не имеем), то картина оказалась бы вроде той, что с некоторыми упрощениями показана на рис. 1, а. Бросается в глаза, что одинаковые частицы регулярно повторяются с одинаковым шагом в параллельных



**Рис. 1. Строение кристаллического вещества:**

а — пример плотноупакованной структуры, построенной из атомов двух сортов; б — пространственная решетка; в — одна из плоских сеток; г — элементарная ячейка

рядах и плоских параллельных слоях. В данном случае взято довольно простое по составу и структуре вещество (допустим, галит  $\text{NaCl}$ ), но отмеченная особенность — общая для всех кристаллических тел. И в этом отношении минералы ничем не отличаются от искусственных кристаллов.

Регулярность внутреннего строения имеет важные последствия для внешнего облика кристаллических тел: именно она обуславливает тенденцию этих тел во время их образования самопроизвольно, как будто без всякого вмешательства извне, принимать форму многогранников.

Учение о форме минералов называется морфологией. Этим же словом обозначают и совокупные сведения о форме конкретных минералов: морфология галенита, морфология гранатов. Обособленное выделение минерала, обладающее единой кристаллической структурой и естественной внешней формой, называется минеральным индивидом. И совершенный кристалл, и зерно породы — индивиды, притом вполне равноправные: оба обладают естественной внешней формой, хотя во втором случае тенденция к кристаллическому самоограничению не реализована. Понятие индивида налагает на форму лишь одно ограничение: она должна быть естественного происхождения. Слово «индивидуум» в переводе с латинского языка означает неделимый. Действительно, разделив индивид, мы этим его уничтожим: естественная форма будет утрачена.

В природе все минералы существуют в виде индивидов, но большей частью не поодиночке, а в сообществах, называемых минеральными агрегатами. Примерами таких образований могут служить песчаник, гранит и другие горные породы; нас, правда, больше будут интересовать агрегаты другого рода.

## **Все вопросы — к индивидам!**

Сделаем остановку и поразмыслим над новыми понятиями.

Все как будто ясно, кроме, пожалуй, одного: зачем понадобилось понятие индивида? Не заслоняет ли оно естественных и немаловажных различий между совершенным кристаллом и бесформенным зерном?

Однако для практического применения минералов еще важнее другое: природа индивида как монокристалла — тела, обладающего единой кристаллической структурой. В технике широко используются монокристаллы различных веществ: кварца, исландского шпата, корунда, флюорита и многих других. Для ювелирной огранки годятся только монокристаллы самоцветов. При этом несущественно, имел ли индивид до обработки правильную внешнюю форму.

Индивиды используются и для нужд самой науки как источники минералогической информации. Здесь на первый план выступает именно их естественный, природный облик, а также детали строения. Форма кристаллов и зерен не случайна, она отражает обстоятельства их образования. А. Е. Ферсман писал: «Кристалл неизменно несет на себе следы предыдущих моментов своего существования, и по его форме, по скульптуре его граней, мелочам и деталям его поверхности мы можем читать его прошлое». А прошлое индивида проливает свет на образование месторождения, о чем узнать

очень интересно и важно. И тут индивиды-зерна сыграют свою роль не хуже многогранных кристаллов.

Как видим, понятие индивида в самом деле содержательно и полезно.

Образование (генезис) минералов — предмет генетической минералогии. Одна из ветвей этой науки изучает физико-химические условия образования минеральных видов. Другая ветвь (непосредственное отношение к которой имеет тема этой книги) занимается вопросами формирования индивидов и агрегатов. Подобное разделение издавна принято в другой науке о природных объектах — биологии: филогенез — учение о видах, онтогенез — учение об особях, о развитии отдельных организмов. Довольно молодое учение о минеральных индивидах и агрегатах получило сходное название онтогении минералов. Как и биологическая особь, индивид — отдельное законченное создание природы. Еще более столет назад эту параллель заметил знаменитый минералог — русский академик Н. И. Кокшаров, и она привела его к понятию минерального индивида: «...Каждое отдельное животное и каждое растение натуральная история рассматривает как особенное, самостоятельное существо или предмет, которого нельзя расчлнить, не нарушив его целостности. Имея это в виду, невольно представляется вопрос: не состоит ли царство минеральное из подобных неделимых?..» Аналогия между минералами и растениями или животными несколько рискованна, но в дальнейшем мы познакомимся с любопытными примерами сходства — разумеется, формального, — «косных» минералов с живыми организмами.

Во взаимоотношениях индивида и агрегата усматривается системная, организационная иерархия царства минералов. Но и эта иерархия до некоторой степени условна: различия между индивидами и агрегатами, как мы увидим, могут быть относительными.

## КРИСТАЛЛЫ МИНЕРАЛОВ

Теперь давайте сосредоточимся на тех индивидах, которые обрели внешность кристаллических многогранников — их мы условились именовать кристаллами. Нелишне еще раз напомнить, что и остальная часть царства минералов, за немногими исключениями, — тела кристаллические. Теснота, в которой они образовались, помешала им самоограниться, но отнюдь не лишила их регулярности внутреннего строения. Этот внутренний порядок зависит только от природы самого вещества и поэтому справедливо считается главным, определяющим свойством кристаллического тела.

Все природные объекты отличает от искусственной продукции одно общее качество. При массовом серийном про-

изводстве изделие тем лучше, чем точнее соответствует установленному стандарту. Природа же стереотипов не знает. Среди колоссального, неподдающегося подсчету количества индивидов одного минерального вида не найдется и двух вполне одинаковых. Это и есть первая аналогия с живыми существами: все особи, например, вида «кошка» или вида «мухомор красный», похожи друг на друга, но непременно чем-то и отличаются — размерами, деталями формы, окраской и т. п. Надо заметить, что в царстве минералов индивидуальные различия несравненно шире и разнообразнее, и требуется известная опытность, а подчас и специальные лабораторные испытания, чтобы не впасть в заблуждение и не принять один минерал за другой.

Разнообразие минеральных индивидов и агрегатов придает особую прелесть коллекционированию минералов. Ученому оно служит напоминанием о том, что красивый минерал — одновременно красноречивый рассказчик, и надо учиться понимать его рассказ. Многообразие минералов не осталось незамеченным основоположниками науки о кристаллах — кристаллографии, составляющей фундамент учения о морфологии минералов.

В историческом процессе дифференциации естественных наук возникновение кристаллографии датируется концом XVII столетия. Ее название происходит от греческого слова «кристаллос» — лед: окаменевшим льдом древние греки считали горный хрусталь (кварц), послуживший первым объектом изучения новой науки. Первоначально кристаллография занималась исключительно изучением и описанием кристаллов минералов, а в дальнейшем распространилась и на исследование и выращивание кристаллов искусственных веществ. Современная кристаллография включает учения о внешней форме кристаллов (геометрическая кристаллография), об их физических свойствах (физическая кристаллография), о внутреннем строении и составе кристаллических веществ (кристаллохимия), теорию кристаллогенезиса — образования кристаллов.

Всякая наука начинается с выявления некоей общности наблюдаемых предметов. Едва ли не самое очевидное общее свойство кристаллов — тенденция самоограняться, принимать форму выпуклых многогранников. Первоначально к кристаллическим относили только те тела, которые обнаружили способность к самоограничению. Уже первые кристаллографы угадывали в этом признак упорядоченного внутреннего строения. Однако исчерпывающее объяснение пришло много позже, когда представления о строении кристаллов сложились в стройную теорию и были подтверждены экспериментами.

Возьмем изображение структуры, проведем через центры частиц параллельные прямые по направлениям кратчайших расстояний между ними, а изображения самих частиц опустим. Получится пространственная решетка — простейшая гео-

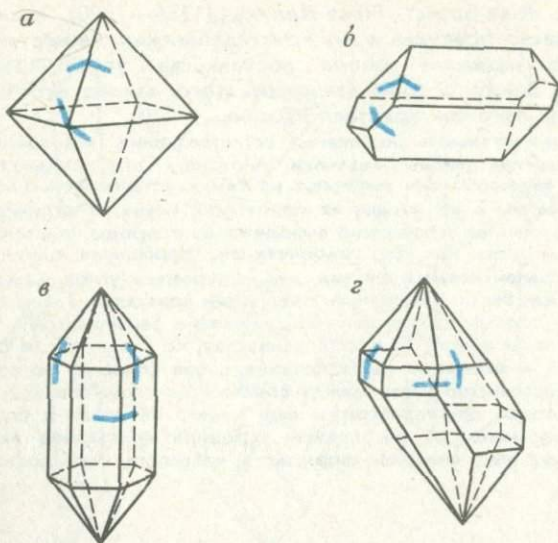


Рис. 2. Закон постоянства углов кристаллов. Соответственные грани кристаллов магнетита (а, б) и горного хрусталя (в, г) образуют друг с другом одинаковые углы.

а, в — идеальные кристаллы; б, г — искаженные кристаллы

метрическая схема кристаллической структуры (рис. 1, б). Решетка как бы делит все пространство кристалла на воображаемые одинаковые кирпичи, образующие плотную, без пустот, кладку. С таким же успехом можно представить, что это пространство занято пакетом параллельных слоев, или плоских сеток, причем можно наметить для них множество различных направлений. В каждой сетке узлы решетки (центры частиц) лежат в одной плоскости (рис. 1, в). Внутри сетки и на ее краях условия для частиц различны: внутри химические связи компенсированы, насыщены, а на краях некоторые связи остаются свободными и создают внешнее силовое поле, за счет которого растущий кристалл и присоединяет к себе новые частицы. Рисунок показывает, что поле сильнее всего там, где край сетки имеет наибольшую кривизну; здесь присоединение частиц должно идти наиболее интенсивно. Кристалл, таким образом, сам стремится спрямить свои очертания: всякая впадина становится ловушкой для частиц, пока не зарастет и не выровняется.

В 1669 г. датчанин Николай Стенон (1638—1686), изучая кварц и гематит, сделал важное наблюдение: хотя кристаллы одного минерала могут иметь разную форму, углы между их соответственными гранями неизменны. Столетие спустя

француз Жан-Батист Ромэ-Делиль (1736—1790) нашел, что это свойство присуще всем кристаллическим веществам. Оно получило название закона постоянства углов кристаллов (рис. 2). Ввиду особой важности этого закона его именуют основным законом кристаллографии.

Фундаментальные положения естествознания, как закон сохранения энергии, законы механики Ньютона, — это исходная информация о явлениях: они вытекают из самих установленных наблюдениями фактов, а не из других положений науки. В отличие от них закон постоянства углов легко выводится из природы кристаллических веществ и даже как бы самоочевиден. Нарращивая одну или несколько граней новыми слоями, мы не изменим углов между этими гранями, как бы ни изменялись пропорции кристалла. Таким образом, на самом деле фундаментальное положение заключается в том, что все кристаллы одного вещества одинаковы по структуре, в силу чего одинаково и взаимное расположение слоев (плоских сеток), а отсюда — постоянство углов между соответственными гранями.

Но первые кристаллографы еще ничего не знали о структурах, и на самую мысль о регулярном строении кристаллов их навели наблюдения над внешней формой, в частности, над постоянством углов.

## «КРИСТАЛЛЫ БЛЕЩУТ СИММЕТРИЕЙ»

В обыденной жизни мы привыкли просто любоваться кристаллами и редко задумываемся, почему они красивы. Теперь, когда мы намерены раздвинуть горизонты мира удивительного и прекрасного, приобщившись к науке о кристаллах, придется осваиваться с новыми понятиями, а главное — приучить себя смотреть на кристаллы глазами аналитика: сравнивать, классифицировать, выделять основное. И в этом тоже можно найти немалое удовольствие.

Видный советский ученый И. И. Шафрановский пишет: «В ограненном кристалле само природное явление как бы ставит готовую, хорошо сформулированную задачу, решение которой невозможно без углубленных геометрических изысканий». Чтобы лучше обозначить эту задачу, поступим так, как поступил бы на нашем месте исследователь: сузим круг вопросов. Займемся общим, временно пожертвовав частным. Для этого надо будет ограничиться идеальными экземплярами кристаллов: типичные, общие черты на них заметнее. Искаженные кристаллы вроде изображенных на рис. 2, кривые ребра, неровные грани — на все это есть свои причины, безусловно заслуживающие нашего внимания. Но всему свое время. Итак, будем говорить о главном — об идеальных или идеализированных кристаллах.

Как очень характерное свойство обращает на себя внимание правильное чередование, повторение одинаковых граней,

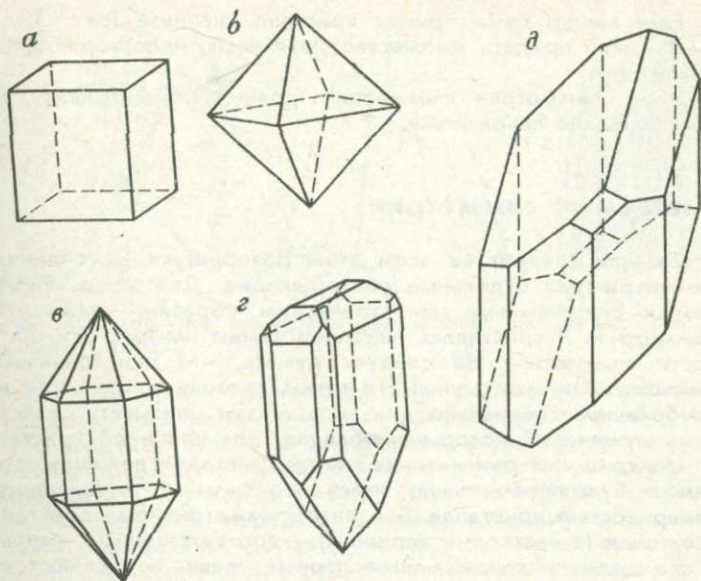


Рис. 3. Кристаллы различных минералов различны по симметрии: а — галит; б — магнетит; в — горный хрусталь; г — гемиморфит; д — аксинит

ребер, вершин — симметрия кристаллических многогранников. Именно симметричностью так ласкают взор кристаллы. Это без лишних слов выражено принадлежащим знаменитому кристаллографу Е. С. Федорову афоризмом, вынесенным в заголовок. Симметричны грани, вершины и ребра кубика галита (рис. 3, а), и какой бы стороной мы ни положили его на стол, разницы не заметим. Про этот кристалл, равно как и про октаэдр магнетита (рис. 3, б), нельзя сказать: расположен вертикально, расположен горизонтально. Эти положения просто неразличимы. Невозможно указать, где у таких кристаллов верх, низ, длина, ширина, высота.

Иначе обстоит дело с кристаллом горного хрусталя (рис. 3, в). Не отличимы друг от друга те несколько положений, когда кристалл лежит на столе одной из боковых граней; нет разницы и между положениями вверх одним или другим концом. Но горизонтальное положение можно безошибочно отличить от вертикального — длина и ширина кристалла определенно различны.

Кристалл гемиморфита (рис. 3, г) имеет и длину, и ширину, и высоту. Ему можно придать не только два разных вертикальных положения, но и два разных горизонтальных: «плашмя» (двумя способами) и «на ребро» (тоже двумя способами).

Еще менее симметричен кристалл аксинита (рис. 3, д): ему можно придать множество различных, неповторяющихся положений.

Итак, симметрия симметрии рознь. Симметричны все кристаллы, но по-разному.

## Слагаемые симметрии

Чтобы как следует во всем этом разобраться, «расчленим» симметрию на отдельные составляющие. Для этого прибегнем к специальным геометрическим образам — элементам симметрии. В кристаллах наиболее важны центры, оси, плоскости симметрии. Не следует думать, что они физически существуют в кристаллах: эти точки, прямые и плоскости мы воображаем специально для того, чтобы описывать свойства симметричности, которыми обладает тот или иной кристалл.

Центр симметрии — точка внутри кристалла, делящая пополам любую проведенную через нее прямую, ограниченную поверхностью кристалла. В «центросимметричном» кристалле все точки (в частности, вершины) — соответственные, парные, а все прямые, соединяющие парные точки, пересекаются в центре симметрии. Из парных точек складываются парные ребра и парные грани; в центросимметричном кристалле они всегда перевернуты друг относительно друга (но не обязательно должны отличаться друг от друга). На чертежах кристаллов центр симметрии отмечают точкой и обозначают буквой С.

Центр симметрии имеется в кубе, октаэдре и во многих других многогранниках гораздо менее симметричной формы (рис. 4, а). Из рис. 3, г заключаем, что в кристалле гемиморфита центра симметрии нет.

На первый взгляд, центр симметрии как будто есть в кристалле горного хрусталя (см. рис. 3, в). На самом деле это не так: внимательное изучение показывает, что головки кристалла огранены нецентросимметричными гранями.

Горный хрусталь (кварц) обладает ценнейшим свойством — способностью электризоваться при сжатии или растяжении. Такие тела называются пьезоэлектриками. Они широко используются в разнообразных технических устройствах — датчиках механических напряжений, стабилизаторах частоты и др. Некоторые кристаллы — пьезоэлектрики — электризуются при нагревании. Впервые это явление было обнаружено в опытах с кристаллами турмалина. Пьезо- и пьезоэлектриками могут быть только нецентросимметричные кристаллы.

Ось симметрии (рис. 4, б) — воображаемая прямая, при повороте вокруг которой кристалл дважды или более раз за один полный оборот совмещается со своим первоначаль-

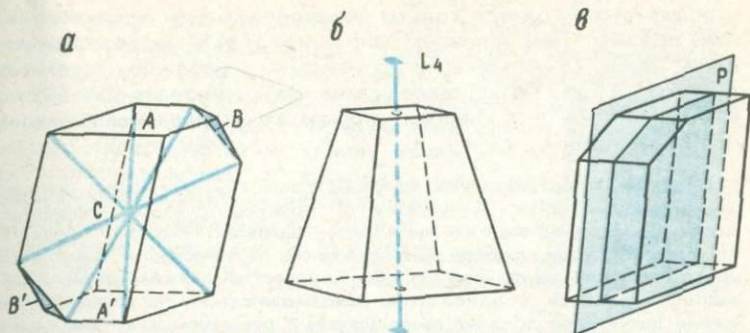


Рис. 4. Элементы симметрии кристаллов: центр [а]; ось [б]; плоскость [в]

ным положением. Количество этих совмещений называется порядком оси симметрии. Ось изображают прямой линией и обозначают буквой  $L$  с индексом, указывающим порядок. Осевая симметрия свойственна многим окружающим нас предметам. Карточные валеты, дамы и короли имеют оси симметрии 2-го порядка, перпендикулярные к плоскости карты. Кастрюля с двумя ручками тоже имеет ось симметрии  $L_2$ , а кастрюля без ручек — это «тело вращения» с осевой симметрией бесконечного порядка  $L_\infty$ .

В кристалле может быть одна или несколько осей симметрии одинакового или разных порядков, а может не быть ни одной оси. В кубе, например, имеются: четыре оси  $L_3$ , каждая из которых проходит через две противоположные вершины, совпадая с одной из пространственных диагоналей куба; три оси  $L_4$ , проходящие через центры противоположных граней; шесть осей  $L_2$ , проходящих через середины противоположных ребер. Все оси пересекаются в одной точке, которая в кубе служит центром симметрии.

В кристалле кварца продольная ось служит осью  $L_3$ ; кроме того, имеются еще три оси  $L_2$ , каждая из которых проходит через середины противоположных боковых ребер. Все эти четыре оси опять-таки пересекаются в одной точке.

Кристалл гемиморфита имеет только одну ось симметрии 2-го порядка. Ее легко найти, пользуясь рис. 3, г. В кристалле аксинита (см. рис. 3, д) совсем нет осей симметрии.

В отличие от других симметричных предметов кристаллические многогранники могут иметь оси симметрии только 2-, 3-, 4- и 6-го порядков. Как и все специфические свойства кристаллов, это связано с упорядоченностью их внутреннего строения. Поясним это на модели «кирпичной кладки» (см. рис. 1, б). «Кирпичи» должны быть одинаковыми по размерам и форме, укладываться одним и тем же способом и заполнять пространство сплошь, без промежутков. Нетрудно убедиться,

что для этого годятся только параллелепипеды и шестигранные призмы. При попытке заполнить пространство, скажем, пяти- либо семигранными призмами неизбежно останутся пустоты, и для кристаллов такие «кирпичи» не подойдут. В связи с этим для внешней формы кристаллов невозможны оси симметрии  $L_5$ ,  $L_7$  и т. д.

В формах органической природы такие оси, наоборот, широко распространены. Так, симметрия  $L_5$  присуща цветам шиповника, морским звездам, многим мелким организмам. Уместно привести по этому поводу любопытное суждение крупнейшего советского кристаллографа академика Н. В. Белова: «Кристаллографический запрет 5-ной оси определяется невозможностью согласования ее (равно как и осей порядка выше шести) с решеткой, с «решетчатым состоянием» кристаллического вещества. И поэтому можно думать, что 5-ная ось является у мелких организмов своеобразным инструментом борьбы за существование, страховкой против окаменения, первым шагом которой была бы «поймка» решеткой живого организма».

Плоскость симметрии — воображаемая плоскость, делящая кристалл на две зеркально-равные части — одна часть как бы является зеркальным отражением другой. Зеркально равны правая и левая руки. Сложите их ладонями: разделяющая ладони плоскость — это плоскость симметрии. На кристалле с плоскостью симметрии обязательно найдется хотя бы пара граней, связанных между собой как предмет и его зеркальное отражение (рис. 4, в). В кубе девять плоскостей симметрии, в кристалле гемиморфита — две (найдите их), в кристалле аксинита — ни одной. Плоскость симметрии обозначают буквой  $P$ .

Симметричность кристаллов представляется вполне очевидной, однако представление о ней вошло в науку лишь сравнительно недавно. Первым подчеркнул серьезное значение симметрии великий французский кристаллограф Рене Жюст Гаюи (1743—1822); его творчество оказало большое влияние на дальнейшее развитие кристаллографии главным образом разработкой проблемы внутреннего строения кристаллов. Понятия оси, плоскости и центра симметрии были позже сформулированы соотечественником Гаюи О. Браве (1811—1863).

Из существования в кристаллах различных элементов симметрии непреложным образом вытекают и законы их взаимодействия друг с другом. Пусть, например, известно, что в кристалле имеются ось  $L_6$  и ось  $L_2$ . Могут ли они располагаться как угодно? Нет, мы не сможем представить себе ничего иного, кроме взаимно перпендикулярного расположения этих осей. Если бы они были расположены иначе, то после поворота вокруг  $L_2$  появилась бы еще одна  $L_6$ , а это уже противоречило бы условию задачи. С другой стороны, наличие оси  $L_6$  обязывает к тому, чтобы в таком кристалле было по крайней мере три оси  $L_2$ . Все элементы симметрии

так или иначе взаимодействуют друг с другом, вследствие чего некоторые их комбинации в кристаллах невозможны, а некоторые обязательны. Так, осей 3-го порядка может быть одна, четыре или ни одной; 4-го порядка — одна, три или ни одной; 6-го порядка — одна или ни одной; все оси симметрии пересекаются в одной точке. Подсчитано, что в кристаллах возможны 32 сочетания, или вида (класса) симметрии. Вид симметрии обозначается формулой, в которой перечисляются элементы симметрии и их число. Так, вид симметрии куба и октаэдра  $3L_44L_36L_29PC$ ; кристалла гемиморфита —  $L_22P$  и т. д. Существуют также сокращенные обозначения видов симметрии.

Каждый минеральный вид кристаллизуется только в одном классе симметрии. Это налагает на форму кристаллов определенные ограничения. Так, минерал, кристаллизующийся в классе симметрии  $3L_44L_36L_29PC$ , можно встретить в виде кубов, октаэдров и некоторых других многогранников, но нельзя встретить, например, в виде трехгранных призм — это уже другой класс.

Математический вывод возможных видов симметрии кристаллов впервые сделал в 1830 г. немецкий профессор И. Ф. Гессель (1796—1872), однако он не был замечен современниками. В 1867 г. русский академик А. В. Гадолин (1828—1892) независимо от Гесселя доказал существование 32 классов симметрии кристаллов. В этих 32 классах размещены все без исключения искусственные кристаллические вещества и все минеральные виды и разновидности.

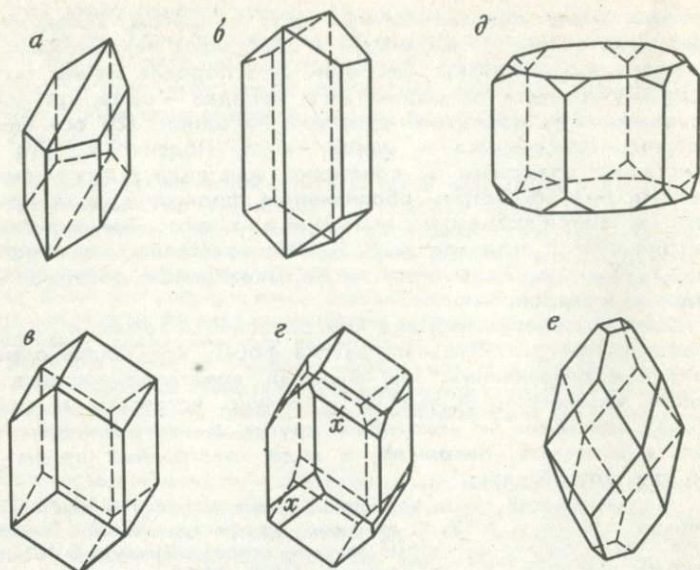
## Разминка для пространственного воображения

Рассмотрим еще несколько примеров, чтобы закрепить наши познания и навыки в определении симметрии кристаллов.

Кристалл аксинита (см. рис. 3, д), как уже отмечалось, принадлежит к наименее симметричным: в нем не обнаруживается никаких элементов симметрии, кроме центра С. В кристалле гипса (рис. 5, а) есть плоскость симметрии, перпендикулярно к ней расположена ось симметрии 2-го порядка, а точка пересечения оси с плоскостью является центром симметрии. Формула симметрии кристалла гипса —  $L_2PC$ . В кристалле арагонита (рис. 5, б) к этим элементам симметрии добавляются еще две оси 2-го порядка и две плоскости симметрии — получается вид  $3L_23PC$ . На примере арагонита стоит задержаться. Его особенность вот в чем: верхняя половина кристалла симметрична нижней, левая — правой, передняя — задней. Симметрия — одновременно и осевая (оси  $L_2$ ), и зеркальная (плоскости симметрии). Таковы далеко не все кристаллы. Например, верхняя и нижняя половины кристалла гемиморфита не симметричны (см. рис. 3, г). Это



4663



**Рис. 5. Примеры кристаллов различных классов симметрии:**  
 а — гипс  $L_2PC$ ; б — арагонит  $3L_23PC$ , в, г — диоптаз  $L_3C$ ; д — берилл  $L_66L_27PC$ ; е — апофиллит  $L_44L_25PC$

значит, что нет ни горизонтальных осей  $L_2$ , ни горизонтальной плоскости, ни центра симметрии. Остается  $L_22P$  — это и есть класс симметрии гемиморфита.

В кристалле кварца (см. рис. 3, в) «верх» и «низ» симметричны, но в отличие от арагонита связаны только осями  $L_2$  (их три), а плоскостей симметрии нет. Диоптаз (рис. 5, в) как будто имеет три вертикальные плоскости симметрии. Однако на некоторых кристаллах (рис. 5, г) есть небольшие грани  $x$ , присутствие которых нарушает зеркальную симметрию. Форма с большим числом граней является более общей. Почему на конкретных кристаллах возникают не все грани общей формы, мы выясним позже. А пока что мы обязаны учесть факт нарушения зеркальной симметрии: ведь те и другие кристаллы заведомо относятся к одному классу. Следовательно, диоптазу нужно приписать формулу симметрии  $L_3C$  вместо  $L_33PC$ .

Ось симметрии  $L_6$  легко обнаружить в кристалле берилла (рис. 5, д) класса  $L_66L_27PC$ . Оси  $L_2$  расположены горизонтально: три проходят через середины противоположных ребер и еще три — через середины противоположных граней. Каждая ось  $L_2$  лежит в одной из вертикальных плоскостей симметрии, и одновременно все они лежат в седьмой, горизонтальной плоскости симметрии.

Кристалл апофиллита (рис. 5, е) имеет вертикальную ось  $L_1$ , четыре вертикальные плоскости симметрии и одну горизонтальную, в которой лежат четыре оси  $L_2$ . На пересечении осей и плоскостей, как и в кристалле берилла, находится центр симметрии.

Подобные тренировочные «разминки» полезно повторять почаще. Выполняя упражнения самостоятельно, можно научиться быстро и почти машинально выявлять элементы симметрии кристаллов. А чертежи для упражнений можно найти в любом учебнике минералогии. Полезно потрудиться и над симметрией окружающих предметов: деревьев, животных, стола, книги, тарелки и др. Все предметы в той или иной мере симметричны, и особенно те, что сработаны руками человека. Подглядев когда-то симметрию у природы, человек убедился, что вещь симметричной формы удобна, а сделать ее намного проще. В сущности, придуманные человечеством машинные способы обработки материалов — точение, сверление, фрезерование, строгание, — сводятся к приданию вещам симметричной формы.

## ИЕРАРХИЯ СИММЕТРИЧНОСТИ

Мы уже немного продвинулись в классификации кристаллов: распределили их по видам, или классам, симметрии.

Но при всем том более естественным кажется классифицировать кристаллы непосредственно по их форме. Ведь наш глаз, можно сказать, самой природой устроен так, чтобы быстро и безошибочно, без учебников и правил, замечать главные различия в форме предметов. Всякий с первого же взгляда отличит друг от друга детский кубик, карандаш, гайку, линейку, спичечный коробок. Хотя такие различия мы делаем автоматически, интуитивно, ничто не мешает нам проанализировать их. У кубика длина, ширина и высота одинаковы, иначе говоря, облик его изометрический. Карандаш имеет облик удлинённый, столбчатый, а гайка — таблитчатый; притом у обоих предметов один размер значительно отличается от двух других, примерно одинаковых. Облик коробка, как и линейки, правильно назвать уплощенным: все три измерения различны.

А как все-таки отличаются эти предметы по симметрии? Немного подумав, вы согласитесь со следующим утверждением: предмет, у которого высота, длина и ширина различны, не может иметь осей симметрии порядка выше 2-го. Это следует отнести к нашему коробку и линейке. Облик шестигранного карандаша, как и гайки, в сильной степени определяется наличием единственной оси  $L_6$ . Что касается кубика, то в нем есть даже несколько осей высшего (выше 2-го) порядка — об этом мы уже говорили.

Тот факт, что облик предмета связан с его симметрией, для нас уже не новость. Но теперь мы попробуем использовать симметрию для классификации обликов — задачи, если вдуматься, совсем не простой.

## Категории симметрии

До сих пор нам приходилось ограничиваться качественной оценкой симметрии. Последние примеры подсказывают, как можно различать предметы по степени симметричности. Видимо, кубик, как «симметричный со всех сторон», надо считать наиболее симметричным, симметрию гайки и карандаша следует признать средней, а линейки и коробка — самой низкой. Нетрудно видеть, что различия сводятся к числу осей высшего порядка. Учитывая их важную роль, мы будем называть эти оси главными. Возникает следующая иерархия симметричности идеальных кристаллических многогранников.

1. Высшая категория: главных осей несколько, как в кубе. Сюда попадут галит и магнетит (см. рис. 3, а, б). Кристаллы высшей категории изометричны и обязательно имеют по четыре оси  $L_3$ .

2. Средняя категория: главная ось только одна, как у карандаша и гайки. Сюда отнесем кристаллы с единственной осью высшего порядка: кварц (см. рис. 3, в), берилл, диоптаз, апофиллит (см. рис. 5). Для них характерны столбчатые и таблитчатые облики.

3. Низшая категория: главных осей нет совсем, как у коробка и линейки. Сюда попадут кристаллы уплощенного и асимметричного обликов: гемиморфит, аксинит, гипс, арагонит (см. рис. 3 и 5).

Читатель может почувствовать недоверие к нашим манипуляциям с симметрией: раз уж мы договорились о типах обликов, то почему бы не классифицировать кристаллы этим простейшим способом — на столбчатые, таблитчатые и т. д.?

В свое время кристаллография прошла через это. Однако, накопив достаточно сведений о кристаллах, ученые пришли к выводу, что облик — ненадежный признак. Среди кристаллов берилла, например, встречаются и «гайки», и «карандаши», но ведь минерал один и тот же. С точки зрения симметрии между «карандашом» и «гайкой» разницы нет. Выходит, симметрия — свойство и характерное, и устойчивое. Поэтому в основу классификации кристаллов была положена все-таки симметрия, а облик сохранил значение второстепенного признака. Этот выбор, явившийся результатом длительных поисков, сделал честь интуиции ученых, ибо, как выяснилось гораздо позже, симметрия тесно связана с главным в кристаллах — правильностью их внутреннего строения.

## Кристаллографические сингонии

Пойдем дальше в нашей классификации кристаллов. Введем еще один признак: наличие или отсутствие перекосов. До сих пор мы принимали во внимание только соотношение длины, ширины и высоты, а теперь будем учитывать еще и важнейшие углы кристалла — так называемые габитусные углы. Взглянем с этой точки зрения еще раз на уже знакомые нам кристаллы. Кристалл аксинита (см. рис. 3, д) перекошен со всех сторон, а кристалл гипса (см. рис. 5, а) — только в «профиль». Кристаллы гемиморфита и арагонита (см. рис. 3, г и 5, б) совсем не имеют перекосов: габитусные углы попарно симметричны, и нетрудно заметить, что это связано с наличием достаточного числа осей 2-го порядка и плоскостей симметрии. По прочим признакам все названные кристаллы относятся к низшей категории. В средней категории все кристаллы без перекосов, но габитусные углы зависят от порядка главной оси: 3-го, как у диоптаза, 4-го, как у апофиллита, или 6-го, как у берилла (см. рис. 5). В высшей категории габитусные углы симметричны со всех сторон.

После этой подготовительной работы мы сможем подразделить все кристаллические многогранники на семь систем, или кристаллографических сингоний (от греческого слова, означающего «сходноугольность»).

В высшей категории окажется одна сингония, называемая кубической. Поскольку она единственная, ее признаки, очевидно, совпадут с признаками высшей категории кристаллов.

Средняя категория в зависимости от порядка главной оси разделится на три сингонии: гексагональную («шестиугольную»), тригональную («треугольную») и тетрагональную («квадратную»).

Низшая категория (главные оси отсутствуют) делится на ромбическую сингонию, в которой кристаллы не имеют «перекосов», моноклинную — с перекосом только в одной проекции (в профиль) и триклинную, где кристаллы перекошены, асимметричны со всех сторон.

## Кристаллографические системы координат

Но кристаллография не была бы точной наукой, если бы ограничивалась наглядными представлениями. Она широко пользуется строгими математическими методами и приемами, один из которых — введение кристаллографических систем координат.

За начало координат примем геометрический центр идеализированного кристалла, а оси направим вдоль важнейших ребер или по главным осям симметрии. Такая система координат отличается от широко известной прямоугольной системы тем, что углы между осями — не обязательно прямые, а зависят от габитусных углов каждого конкретного кристалла.

Условимся всегда располагать кристалл так, чтобы главная ось проходила вертикально. Если ее нет, повернем кристалл так, чтобы вертикальной оказалась группа наиболее выраженных параллельных ребер. Тогда одна из координатных осей тоже займет вертикальное положение; присвоим ей обозначение III. Две другие оси выберем так: одну направим к себе и назовем осью I; другую направим вправо, и пусть это будет ось II. (На всех предыдущих рисунках кристаллы изображены именно в такой «кристаллографической установке»). Координатную систему будем характеризовать отрезками осей  $a$ ,  $b$ ,  $c$  от центра до пересечения с гранями и углами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  между осями. Получается «осевой крест» — что-то вроде скелета кристалла, выражающего общий характер его симметрии и внешнего облика. При классификации кристаллов осевой крест избавит нас от необходимости входить в подробности формы каждого экземпляра со всеми его гранями, ребрами и вершинами.

Наша следующая задача — выявить возможные типы осевых крестов, изменяя оси и углы.

Тип 1 — все оси равны, все углы прямые:  $a=b=c$ ,  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  (рис. 6, а). Кристаллы с такими осевыми крестами могут быть только в кубической сингонии.

Тип 2 — углы прямые, но равны только две оси:  $a=b \neq c$ ,  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  (рис. 6, б) — тетрагональная сингония.

Тип 3 — все оси различны, углы прямые: ромбическая сингония (рис. 6, в).

Тип 4 — оси различны, один из углов непрямой:  $a \neq b \neq c$ ,  $\alpha=\gamma=90^\circ$ ,  $\beta > 90^\circ$  (рис. 6, г). «Перекося» в одном направлении говорит о принадлежности к моноклинной сингонии.

Тип 5 — оси различны, все углы непрямые:  $a \neq b \neq c$ ,  $\alpha > 90^\circ$ ,  $\beta > 90^\circ$ ,  $\gamma > 90^\circ$  — триклинная сингония (рис. 6, д).

Тип 6. Для кристаллов с единственной главной осью  $L_3$  или  $L_6$  удобнее четырехосная система координат (рис. 6, е), в которой три равные оси лежат в горизонтальной плоскости под углами  $120^\circ$  друг к другу, а четвертая перпендикулярна им и совпадает с главной осью кристалла. Такая система координат хорошо подойдет для кристаллов тригональной и гексагональной сингоний\*.

\* В некоторых руководствах обе эти сингонии объединяются в одну, называемую гексагональной.

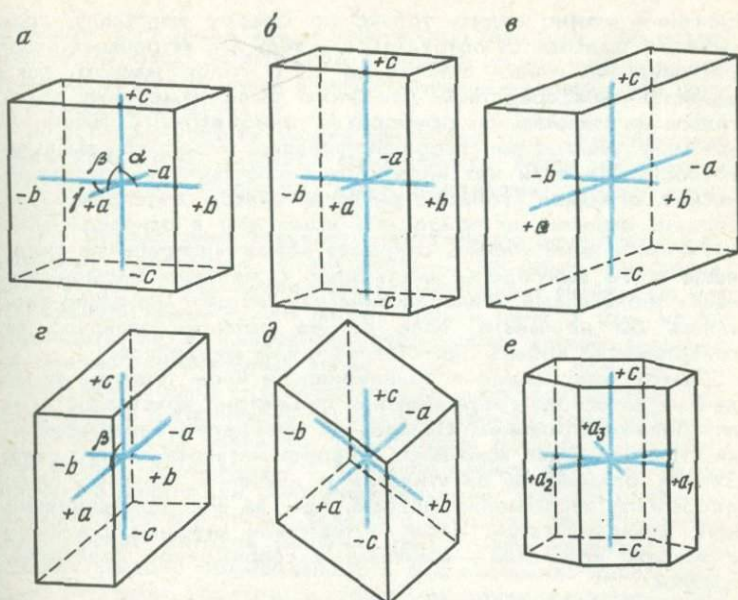


Рис. 6. Осевые кресты в кубической [а], тетрагональной [б], ромбической [в], моноклинной [г], триклинной [д], тригональной и гексагональной [е] сингониях

Этим возможные варианты исчерпываются. Первые пять типов осевых крестов однозначно соответствуют пяти сингониям, а шестой тип — одновременно двум сингониям: тригональной и гексагональной.

Подведем итог. Иерархия симметричности кристаллов выглядит следующим образом. По наличию главных осей (т. е. осей симметрии порядка выше 2-го) все кристаллы делятся на три категории, объединяющие семь сингоний, в каждую из которых входят кристаллы с однотипными осевыми крестами. В свою очередь сингонии по сочетаниям элементов симметрии делятся в общей сложности на 32 класса. Как видим, критерий симметрии весьма эффективен: он обеспечивает каждому минералу при всем разнообразии его формы свое место в систематике кристаллов.

## Методы работы профессионалов

Если минерал известен, то мудрить с определением его сингонии нет надобности — достаточно раскрыть на нужной странице справочник. А вот когда минерал неизвестен и о

сингонии можно судить только по самому кристаллу, специалисту приходится потрудиться — ведь его устраивает лишь достоверный ответ. Вплоть до 20-х годов нашего века единственным средством для этого было измерение кристаллов на специальных приборах — гониометрах. С течением времени гониометры совершенствовались и достигли высокой точности. Но если нет индивидов с собственной кристаллической огранкой, гониометрический метод бессилён. Увы, хорошо ограненные природные кристаллы в основном уже изучены, и ныне ученые, открывая новые минеральные виды, чаще всего вынуждены иметь дело с мелкими бесформенными зернышками. Минералогическая систематика давно топталась бы на месте, если бы ее развитие зависело от совершенства добытых кристаллов новых минералов.

Выход был найден в принципиально ином подходе к задаче — на основе связи внешней симметрии кристаллов с их внутренним строением. Правда, как определять характеристики структур, стало ясно лишь в первой четверти нашего века. Зато в ближайшие десятилетия в изучении структур было достигнуто несравненно больше, чем за всю предшествующую историю науки. Идея соответствия внешней формы и структуры кристалла — ключевая в современной кристаллографии.

Обратимся вновь к пространственной решетке кристалла (см. рис. 1). Наименьший из повторяющихся «кирпичей» называется элементарной ячейкой (см. рис. 1, г). Она может иметь форму либо параллелепипеда (в частном случае куба или квадратной призмы), либо шестигранной призмы, и в одной и той же ориентировке, без поворотов и без пропусков, повторяется во всем объеме кристалла, сплошь заполняя пространство. На рис. 1, б элементарная ячейка выделена в нижнем углу решетки. Чтобы описать всю геометрию элементарной ячейки, достаточно всего шести величин: длин трех ее ребер — параметров  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$  и углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  между ребрами. Симметричную ячейку описать еще проще: для кубической, например, достаточно всего одной величины — параметра  $a_0$ : ведь остальные параметры такие же, а все углы — прямые.

Сопоставив рис. 1, б и г, можно видеть, что элементарная ячейка дает полное представление о структуре кристалла. С другой стороны, ячейка связана с его внешней формой. Важнейшие ребра кристалла — это ряды пространственной решетки. Следовательно, координатные оси должны располагаться вдоль ребер элементарной ячейки. Ячейка как бы содержит осевой крест «в миниатюре»: углы те же, отношения параметров  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$  равно отношению координатных осей  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . В самом деле, многогранники, в которые вписаны осевые кресты (см. рис. 6), вполне могли бы по своей форме претендовать на роль элементарных ячеек в соответ-

ствующих сингониях. Так, в кубической сингонии элементарная ячейка имеет форму куба, в тетрагональной — правильной четырехгранной призмы, в гексагональной — правильной шестигранной призмы и т. д.

Итак, элементарная ячейка заключает признаки сингонии. Сингонией можно назвать совокупность видов симметрии кристаллов со сходными характеристиками элементарных ячеек.

Это определение отвечает поставленной цели: связывает внешнюю симметрию с внутренним строением кристалла. Дело за тем, чтобы распознать элементарную ячейку. Но как это сделать? Конечно, не может быть и речи о том, чтобы разглядеть ее в микроскоп, пусть даже самый сильный: параметры элементарных ячеек имеют тот же порядок, что и размеры атомов — стомиллионные доли сантиметра. Все рассуждения о структурах оставались, строго говоря, в рамках гипотез, пока не появилась возможность проверить их опытным путем. Произошло это в начале нашего века благодаря открытию дифракции рентгеновских лучей при прохождении их через кристаллические тела. Это открытие лежит в основе современных методов рентгеноструктурного анализа, чрезвычайно широко применяемого в исследованиях кристаллов. Они позволяют быстро и точно находить характеристики кристаллических структур, представленных индивидуальными или обломками любой формы и размера, вплоть до порошка.

С тех пор кристаллографы, занимающиеся структурами, навсегда избавились от кабанной зависимости от качества кристаллов. Но в повседневной практике, когда приходится иметь дело с более или менее правильными кристаллами, определение сингонии на глаз сохраняет роль важного профессионального навыка, необходимого минералогу так же, как инженеру — навык различать по внешнему виду сортаменты стального проката, болтов, гаек.

Учение о сингониях («системах») разработано немецким кристаллографом Х. Вейсом (1780—1856) и австрийским минералогом Ф. Моосом (1773—1839) — прославленным автором шкалы твердости минералов. Основные положения этого учения сохранили свое значение до сих пор. Научный подвиг Х. Вейса и Ф. Мооса мог быть оценен по достоинству лишь при нынешнем уровне знаний о природе кристаллов. А ведь в то время само представление о симметрии кристаллов только зрело в сознании ученых!

Первый гониометр, изобретенный помощником Ромэ-Делиля французом М. Каранжо в 1782 г., представлял собой комбинацию транспортира и линейки, которые для измерения граничных углов прикладывали к кристаллу. Позже на смену прикладному гониометру пришел отражательный (У. Х. Волластон, 1809 г.); для измерения углов в нем использовалось отражение гранями пучка света. Отражательный гониометр был коренным образом усовершенствован одновременно и независимо друг от друга выдающимися кристаллографами Е. С. Федоровым (1853—1919) и В. Гольдшмидтом (1853—1933).

В 1855 г. О. Браве сделал вывод всех типов пространственных решеток и элементарных ячеек. В 1890 г. Е. С. Федоров дал исчерпывающий анализ симметрии кристаллических структур. Основы кристаллохимии — современного учения о структурах кристаллов — заложены в начале нашего века Е. С. Федоровым и немецким минералогом П. Гротом (1843—1927).

Открытие дифракции рентгеновских лучей в кристаллах (1912 г.) принадлежит немецкому физику М. Лауэ (1879—1960); им же был разработан один из методов рентгеноструктурного анализа. Крупнейшие вклады в создание этих методов внесли Г. В. Вульф (Россия, 1913 г.), У. Г. и У. Л. Брэгги — отец и сын (Англия, 1913 г.), П. Дебай и П. Шеррер (Германия, 1916 г.). Рентгеноструктурный анализ вскоре получил широкое признание, и гониометрический метод постепенно утратил свое значение в определении сингоний, но продолжает использоваться для изучения формы кристаллов.

## **МНОГООБРАЗИЕ: ПРОБЛЕМА ПРОСТОГО И СЛОЖНОГО**

Многообразие форм кристаллов, разумеется, не исчерпывается видами симметрии. Так, два кристалла, изображенные на рис. 7, имеют один и тот же набор элементов симметрии  $L_3L_24P$ , но тем не менее различны по форме.

### **Простые кристаллографические формы**

Все боковые грани кристалла, изображенного на рис. 7, а, можно получить из одной исходной плоскости, параллельной оси  $L_3$ . Повернем эту ось на один полный оборот — и вместо одной получим три симметричные плоскости. На их пересечениях возникнут ребра, ограничивающие боковые грани кристалла. Тем же способом можно получить грани верхней половины другого кристалла (рис. 7, б), но исходная плоскость должна быть расположена наклонно к оси  $L_3$ ; чтобы получить три нижние грани, следует дополнительно воспользоваться горизонтальной плоскостью симметрии. В том и другом случаях построение привело к появлению новых элементов симметрии — трех  $L_2$  и трех  $P$ . С их помощью также можно было бы получить найденные грани, даже не пользуясь осью  $L_3$ .

Совокупность граней, получаемых с помощью элементов симметрии из одной исходной плоскости, называется простой кристаллографической формой. В наших примерах элементы симметрии одинаковы, но исходные плоскости различны, а потому получились и различные простые формы. Все грани

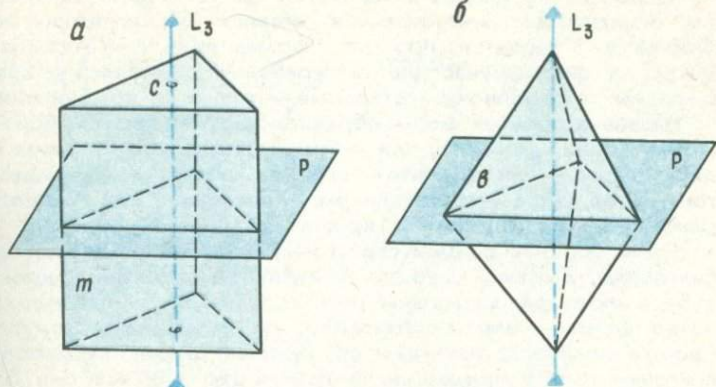


Рис. 7. Образование простых форм кристаллов

одной простой формы обозначим одной буквой, как это принято в кристаллографии.

С помощью оси и плоскости симметрии все очертание правого кристалла получается из единственной исходной плоскости. Для левого — исходных плоскостей требуется две:  $m$  — параллельная оси  $L_3$  и  $c$  — перпендикулярная  $L_3$  и параллельная  $P$ . Ограничение левого кристалла — комбинация двух простых форм  $m$  и  $c$ , причем форма  $c$  состоит всего из двух граней.

И вообще, любой кристалл огранен одной простой формой либо комбинацией простых форм. При отсутствии искажений все грани одной простой формы одинаковы — такие кристаллы называются правильно ограненными. Размеры и очертания граней простой формы зависят от комбинации с другими формами; преобладающая простая форма определяет габитус комбинации. Грани одной простой формы одинаковы по твердости, растворимости, электрическим, тепловым и другим физическим свойствам, деталям окраски, штриховке и другой «скульптуре», отражающей многосложную историю формирования кристалла. И наоборот, грани разных простых форм обычно отличаются рельефом поверхности и свойствами. В этом — одно из проявлений анизотропии кристаллов — неодинаковости свойств по разным направлениям.

## Систематика простых форм

Из рис. 7 видно, что одной простой формы не всегда достаточно для огранения кристалла. Правый кристалл огранен единственной простой формой  $b$ . На левом же кристалле

ни форма *m*, ни форма *c* не могли бы выполнить эту роль по отдельности: многогранник остался бы незамкнутым. Форма *b* — закрытая простая форма, *m* и *c* — открытые. Закрытые формы участвуют в огранении кристаллов в комбинациях и поодиночке, открытые — только в комбинациях.

Названия простых форм образованы от греческих корней: моно — один, ди — два, три — три, тетра — четыре, пента — пять, гекса — шесть, окта — восемь, додека — двенадцать, гон — угол, эдра — грань, пинакс — доска и т. д. Распространенные простые формы кристаллов показаны на рис. 8.

Одни простые формы свойственны только определенным сингониям, другие — разным. В кубической сингонии, кроме куба и октаэдра, возможны ромбододекаэдр, пентагондодэкаэдр (грани — неравносторонние пятиугольники), тетраэдр (форма молочного пакета) и др. Простые формы кубической сингонии имеют четное число граней (до 48), все они без исключения закрытые и в других сингониях не встречаются.

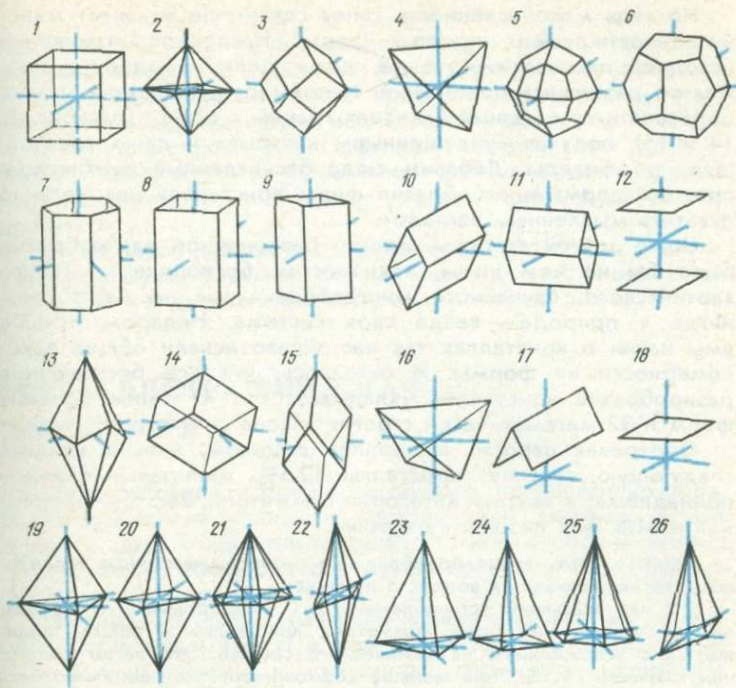
В средней категории, напротив, распространены открытые простые формы с малым числом граней — моноэдр (одна грань) и пинакоид (две параллельные грани). Этим граням «разрешено» занимать только одно положение — перпендикулярно главной оси, иначе их было бы соответственно больше, и тогда получились бы уже другие простые формы — призмы (грани параллельны главной оси) или пирамиды (грани наклонны к главной оси). Те и другие в зависимости от порядка главной оси бывают тетрагональными (поперечное сечение — квадрат), тригональными (равносторонний треугольник), гексагональными (равносторонний шестиугольник), а также с удвоенным числом граней. В отличие от геометрических призм и пирамид они имеют только боковые грани, будучи, таким образом, открытыми формами. При наличии плоскости симметрии, перпендикулярной главной оси, получаются дипирамиды — закрытые формы.

Кристалл, изображенный на рис. 7, б, огранен тригональной дипирамидой; на рис. 7, а — комбинацией тригональной призмы и пинакоида.

В низшей категории часто встречаются пинакоиды и моноэдры, ромбические призмы, пирамиды и дипирамиды (поперечное сечение — ромб). Специфические для этой категории формы — диэдр и ромбический тетраэдр.

## Хаос и порядок

Сколько существует форм кристаллов? Много! Даже очень много! Увы, едва ли такая констатация заметно расширит наши представления о кристаллах. Попробуем поставить вопрос иначе: сколько существует простых форм? На это уже можно ответить конкретнее.



**Рис. 8. Распространенные простые формы кристаллов:**

1 — куб; 2 — октаэдр; 3 — ромбододекаэдр; 4 — тетраэдр; 5 — тетрагонтриоктаэдр; 6 — пентагондodeкаэдр; 7 — 11 — призмы: гексагональная (7), тетрагональная (8), ромбические (9—11); 12 — пинакоид; 13 — скаленоздр; 14, 15 — ромбоэдры; 16 — ромбический тетраэдр; 17 — диэдр (дóма); 18 — моноэдр; 19—22 — дипирамиды: тригональная (19), тетрагональная (20), гексагональная (21), ромбическая (22); 23—26 — пирамиды: тригональная (23), тетрагональная (24), гексагональная (25), ромбическая (26). В кубической сингонии встречаются формы 1—6; в тетрагональной — 8, 12, 18, 20, 24; в ромбической и моноклинной — 9—12, 16—18, 22, 26; в триклинной — 12, 18; в тригональной — 7, 12, 13—15, 18, 19, 21, 23, 25; в гексагональной — 7, 12, 18, 21, 25

Будем рассуждать так: исходная плоскость параллельна, перпендикулярна или наклонна к тому или иному элементу симметрии; всего сочетаний элементов симметрии может быть 32; размножая плоскость симметрическими операциями, можно «синтезировать» любые простые формы. Делалось это не один раз и всегда с одним и тем же результатом: возможны простые формы кристаллов 47 типов. Получается, что не так уж и много?

Но ведь малочисленность типов совсем не означает малочисленности самих простых форм! Наклонное положение исходной плоскости — это на самом деле не одно, а множество различных положений. Например, ромбоэдры можно образовать при разных наклонах граней к оси  $L_3$  (см. рис. 8, 14 и 15), получая «уплощенные», «острые» и даже «острейшие» ромбоэдры. Добавим сюда бесчисленные комбинации простых форм: многообразие форм кристаллов невозможно охватить мысленным взглядом.

Но, с другой стороны, просто бесконечное разнообразие было бы не чем иным, как хаосом, беспорядком. Такого хаотического, случайного многообразия мы не наблюдаем нигде в природе — везде своя система. Недаром лучшие умы науки о кристаллах так настойчиво искали общие закономерности их формы. И оказалось, что все бесконечное разнообразие кристаллов укладывается в 47 типов простых форм и 32 математически строгих закона симметрии!

Обозревая царство минералов в целом, можно увидеть следующую картину: кристаллы 12,5% минеральных видов принадлежат к высшей категории симметрии, 26,5% — к средней и 61% — к низшей категории.

Налицо столь явное преобладание низкосимметричных кристаллов, что напрашивается вопрос о причине.

На нее указывает установленный Е. С. Федоровым и П. Гротом закон, согласно которому симметрия кристаллов в общем понижается с усложнением их химического состава. Это легко понять: чем сложнее состав, тем меньше возможности построения высокосимметричных структур, так как в дело идут разнокалиберные строительные единицы — атомы разных элементов. Отсюда и тенденция к понижению внешней симметрии кристаллов. Закон Федорова — Грота имеет статистический характер: он относится к большим группам веществ, но не применим к отдельным соединениям. Так, гранат и азурит — кристаллографические антиподы (кубическая и моноклиновая сингонии), хотя одинаковы по сложности состава — оба содержат по четыре различных элемента. Но в целом и минералы, и искусственные кристаллические вещества подчиняются закону Федорова — Грота: алмаз, большое число самородных металлов, сульфидов и оксидов (один или два элемента) относятся к кубической сингонии, в то время как минералы более сложного состава — силикаты, сульфаты и др. — занимают в основном нижние ступени иерархической лестницы симметрии.

С другой стороны, с усложнением состава численность минеральных видов растет, так как большее число элементов может образовать больше соединений. Этим и объясняется преобладание в царстве минералов представителей низшей категории симметрии. Оно станет еще заметнее, когда мы перейдем к рассмотрению кристаллов, несущих на себе следы влияния окружающей их среды.

А как обстоит дело с разнообразием кристаллических форм, если присмотреться к отдельным минеральным видам? По-разному. Галит, например, почти всегда встречается в виде кубов, хотя его класс симметрии допускает некоторые дру-

гие формы. Совсем иначе выглядит кальцит: на его кристаллах отмечено около 700 простых форм. Чтобы познакомиться со всеми формами минерала, требуется просмотреть множество образцов: на одном единственном кристалле полного набора простых форм не встретишь. Чертежи таких воображаемых «обобщенных» кристаллов можно увидеть только в справочниках, где им отдается предпочтение ради экономии места.

Эти любопытные факты, несомненно, должны привлечь наше внимание. Возьмем их на заметку, чтобы вернуться к ним, как и к другим «частностям», несколько позже.

## КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ СИМВОЛИКА

Ученые выработали специальные приемы, позволяющие обозначить положение граней в координатной системе, а тем самым и друг относительно друга. С этими обозначениями полезно познакомиться, чтобы лучше понимать язык кристаллографов и минералогов.

Условимся не делать различия между параллельными гранями. Такие грани входят в один пакет плоских сеток, одинаково ориентированы в структуре, физически идентичны. Поскольку нас интересует только угловая ориентировка грани, мы можем ее зафиксировать отношением отрезков, которые грань отсекает на координатных осях. Из рис. 9, а видно, что это отношение в силу подобия фигур остается постоянным для всех параллельных граней данного направления. Упростим задачу: 1) перенесем нашу грань параллельно первоначальному положению так, чтобы она пересекала координатные оси в узлах пространственной решетки; 2) выразим отсекаемые осевые отрезки в числах  $m$ ,  $n$ ,  $p$  параметров элементарной ячейки — эти числа всегда целые. Пусть, например, плоскость грани отсекает на оси I четыре параметра  $a_0$ , на оси II — четыре параметра  $b_0$  и на оси III — шесть параметров  $c_0$ . Получаем для данной грани  $m:n:p = 4:4:6 = 2:2:3$ .

Но когда грань параллельна одной из координатных осей, отрезок надо считать «бесконечным», что неудобно. Поэтому вместо отношения отрезков условились пользоваться

отношением обратных им величин  $\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p}$ . Это отношение приводят к целым числам, а знаки деления опускают.

Например,  $\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p} = \frac{1}{2} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} = \frac{3}{6} : \frac{3}{6} : \frac{2}{6} = 3:3:2$ , символ данной грани (332). Все три числа — индексы — читаются от-

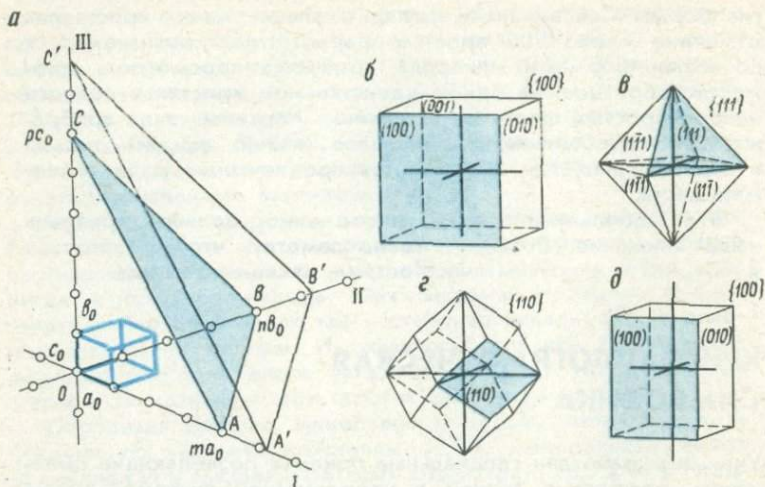


Рис. 9. Символика граней кристаллов. Грань  $A'B'C'$  можно параллельным переносом привести в положение  $ABC$ , когда она пересекает координатные оси в узлах решетки (а). Кристаллографические символы граней куба (б), октаэдра (в), ромбододекаэдра (г), тетрагональной призмы (д)

дельно: «три, три, два». При такой системе обозначений индекс грани, параллельной координатной оси, равен нулю:  $(120)$  — грань параллельна оси III,  $(001)$  — осям I и II,  $(101)$  — оси II. Если грань пересекает координатную ось в ее отрицательной части, соответствующий индекс отрицателен:  $(00\bar{1})$  — «ноль, ноль, минус один». Когда символы двух граней отличаются только одним индексом, больший угол с соответствующей координатной осью составляет грань с большим индексом. Так, грань  $(201)$  пересекает ось I под большим углом, чем грань  $(101)$  в той же координатной системе.

Указывая угловую ориентировку грани относительно осевого креста, символ грани выполняет и другую важную функцию: определяет положение грани в пространственной решетке, в структуре кристалла.

Существуют правила определения символов любых граней кристаллов. Читатель может познакомиться с ними по любому курсу кристаллографии.

В качестве символа простой формы служит символ одной из ее граней — ближайшей к наблюдателю. Чтобы не возникло путаницы, установка кристалла и координатная система должны быть выбраны правильно. Символ простой формы заключают в фигурные скобки. Так, в кубической сингонии символ  $\{100\}$  соответствует кубу с шестью гранями  $(100)$ ,  $(010)$ ,

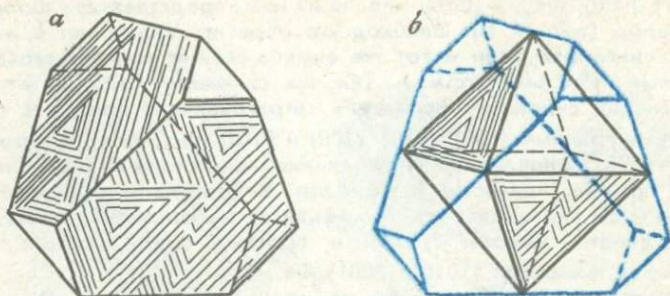
(001),  $(\bar{1}00)$ ,  $(0\bar{1}0)$  и  $(00\bar{1})$ ; первая из них «представляет» форму в целом (рис. 9, б). Необходимо обратить внимание: в разных сингониях один и тот же символ может соответствовать разным простым формам. Тем же символом  $\{100\}$  в тетрагональной сингонии обозначена тетрагональная призма с четырьмя гранями  $(100)$ ,  $(010)$ ,  $(\bar{1}00)$  и  $(0\bar{1}0)$  (рис. 9, д), а в ромбической, моноклинной и триклинной сингониях — ромбическая призма, пинакоид и моноэдр. В тригональной и гексагональной сингониях, где применяется четырехосная система координат, символы граней и простых форм состоят из четырех индексов:  $(10\bar{1}0)$ ,  $\{0001\}$  и т. д.

Напомним, что масштабы измерения отрезков по разным осям в общем случае не совпадают: ведь за единицы измерения мы выбрали разные параметры элементарной ячейки. Поэтому равенство индексов само по себе не говорит о том, что грань одинаково расположена по отношению к соответствующим осям. Такой вывод был бы безусловно справедлив только в случае кристалла кубической сингонии, где элементарная ячейка всегда имеет равные ребра и прямые углы. На рис. 9, в, г, видно, что грани октаэдра  $\{111\}$  расположены под одинаковыми углами ко всем трем осям и отсекают от них равные отрезки, а грани ромбододекаэдра  $\{110\}$  таким же образом расположены к двум осям, будучи параллельны третьей. В тетрагональной сингонии аналогичное правило распространяется на первые два индекса, в тригональной и гексагональной — на первые три. В низших сингониях равным индексам соответствуют неравные осевые отрезки и неравные углы.

В триклинной сингонии возможны моноэдры и пинакоиды любых символов. В остальных сингониях возникают ограничения, налагаемые симметрией: в моноклинной сингонии хотя бы один индекс в символе моноэдра или пинакоида должен быть равен нулю, а в ромбической — два; в тетрагональной сингонии возможны пинакоиды и моноэдры только вида  $\{001\}$ , в тригональной и гексагональной —  $\{0001\}$ . В высшей категории эти формы невозможны. Читателю не составит большого труда убедиться в правильности этих положений.

## МИНИ-ПРАКТИКУМ ПО КРИСТАЛЛОГРАФИИ

В завершение теоретического минимума по геометрической кристаллографии предлагаем читателю несколько упражнений, которые можно рассматривать как введение в «практическую» часть кристаллографии. Без постоянной практики — это нужно подчеркнуть особо — немыслимо изучение даже начальных



**Рис. 10. Кристалл сфалерита:**

а — комбинация двух тетраэдров; б — ложный октаэдр — оба тетраэдра развиты одинаково

основ этой науки. Студенты — будущие геологи упражняются на объемных моделях кристаллов из дерева, картона или пластмассы. Нам придется довольствоваться фотографиями и чертежами, возмещая недостаток наглядности собственным терпением и внимательностью. Каждый пример нужно обязательно разобрать до конца и добиться предельной ясности.

Начнем с кристалла сфалерита. Один из распространенных габитусов показан на рис. 10, а. Всего на кристалле 8 граней, половина которых находится с его обратной стороны: 4 одинаковые гладкие грани и столько же одинаковых граней, покрытых треугольной штриховкой. Наличие граней с поверхностями двух типов заставляет предположить, что в ограничении кристалла участвуют по крайней мере две простые формы. Когда совокупность граней напоминает простую форму, нужно постараться представить, какая объемная фигура получится, если эти грани продолжить до пересечения друг с другом. Тогда остальные простые формы как бы исключаются, а данная форма получается в чистом виде. Выполняя эту процедуру по очереди с гладкими и штрихованными гранями, убеждаемся, что обе простые формы — равносторонние тетраэдры, расположенные так, что каждая из четырех вершин штрихованного тетраэдра отсечена одной из четырех граней гладкого тетраэдра. Кристалл следует отнести к кубической сингонии, так как равносторонние тетраэдры нигде больше не встречаются. Каждая из четырех осей  $L_3$  проходит через центр гладкой грани и центр противоположной ей штрихованной грани. Когда оба тетраэдра развиты примерно одинаково, получается «ложный октаэдр» (рис. 10, б). На кристаллах сфалерита встречаются и некоторые другие формы кубической сингонии.

Кристалл вилуита (разновидность везувиана, рис. 11) имеет единственную ось симметрии 4-го порядка и, следовательно —

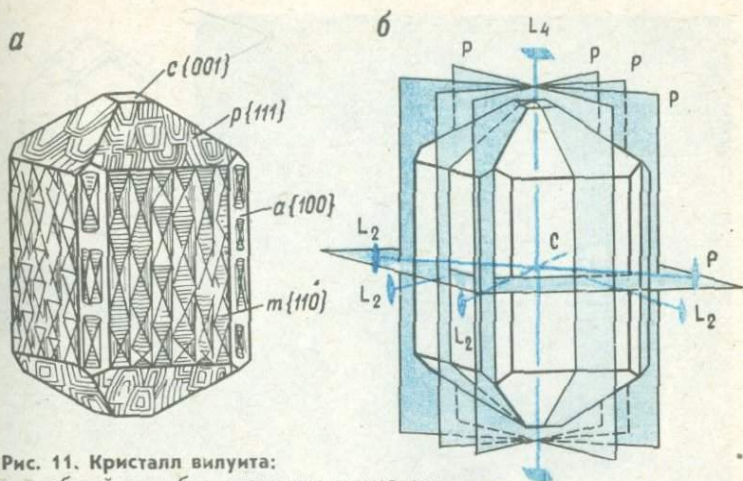


Рис. 11. Кристалл вилуита:  
 а — общий вид; б — элементы симметрии

но, должен быть отнесен к тетрагональной сингонии. Перпендикулярно  $L_4$  расположены четыре оси  $L_2$  и плоскость симметрии; еще четыре плоскости симметрии проходят вертикально, каждая делит кристалл на две продольные зеркально-равные части. Все оси и плоскости симметрии пересекаются в одной точке, которая является центром симметрии (рис. 11, б).

Поверхность кристалла испещрена узорами (см. рис. 11, а), помогающими расчленить ограничение на простые формы. Четыре широкие боковые грани образуют тетрагональную призму  $m$ , четыре узкие боковые грани — еще одну тетрагональную призму  $a$ , восемь косых граней на нижней и верхней головках — тетрагональную дипирамиду  $p$ . Все эти формы различны и по скульптуре граней. Вершины дипирамиды усечены двумя гладкими гранями пинакоида  $c$ .

В кристалле вилуита нетрудно наметить осевой крест (см. рис. 11, б). Ось III совместим с  $L_4$ , ось I проведем через центры двух противоположных граней призмы  $a$ , ось II — через другую пару граней той же призмы. Тогда ближайшая грань призмы  $a$  окажется параллельной осям II и III и пересечет только ось I; следовательно, призму  $a$  можно обозначить символом  $\{100\}$ . Ближайшая грань призмы  $m$  пересекает оси I и II под одинаковыми углами в  $45^\circ$  и параллельна оси III; поскольку кристалл тетрагональный, параметры элементарной ячейки по осям I и II равны:  $a_0 = b_0$ ; следовательно, можем записать  $m \{100\}$ . Грани дипирамиды  $p$  пересекают все три оси, отсюда  $p \{111\}$ . Наконец, пинакоид  $c$  из двух горизонтальных граней будет иметь символ  $\{001\}$ .

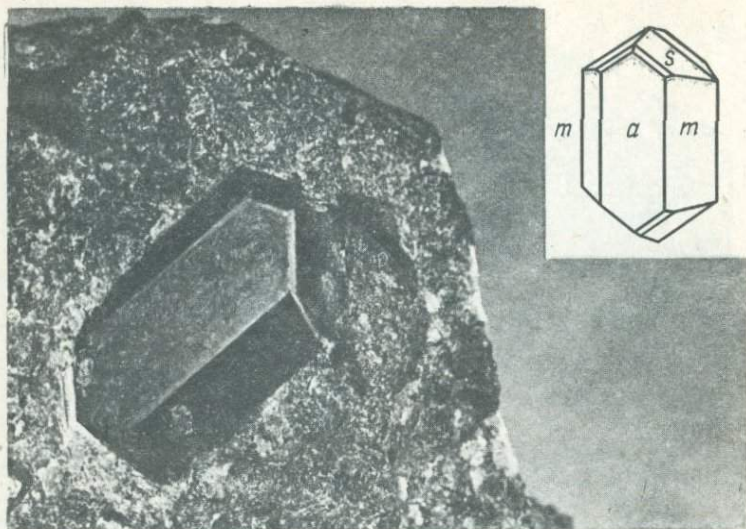


Рис. 12. Кристалл рамзайта. Хибины

В качестве минерала ромбической сингонии рассмотрим довольно редкий минерал рамзайт (рис. 12). Для нашего практикума он удобен четкостью кристаллической формы. Кристалл огранен комбинацией пинакоида  $a$   $\{100\}$ , ромбической призмы  $m$   $\{210\}$  и ромбической дипирамиды  $s$   $\{111\}$ . Вид симметрии —  $3L_23PC$ .

Кристаллы арсенопирита, изображенные на рис. 13, а и б, огранены комбинациями ромбических призм  $m$ ,  $g$ ,  $u$ . Ось I естественно расположить вдоль ребра призмы  $u$ , ось III — вдоль ребра призмы  $m$ , ось II — перпендикулярно I и III. По всей видимости, получается ромбическая сингония и класс симметрии  $3L_23PC$ , причем координатные оси лежат в плоскостях симметрии и совпадают с осями симметрии. В такой установке призма  $m$  будет иметь символ  $\{110\}$ , а призма  $g$  —  $\{011\}$ . Призмы  $g$  и  $u$  ориентированы одинаково (их оси совпадают), но грани имеют разные наклоны к координатным осям; в соответствии с правилами кристаллографического индцирования найдено  $u$   $\{014\}$ .

Арсенопирит долгое время считался ромбическим минералом, но с развитием рентгеноструктурного анализа была доказана его принадлежность к моноклинной сингонии. Это не единственный случай, когда изучение кристаллической структуры уточнило представление, основанное на внешней форме кристалла. В данном случае мы имеем дело с псевдосимметрией — кажущейся более высокой симметрией. Су-

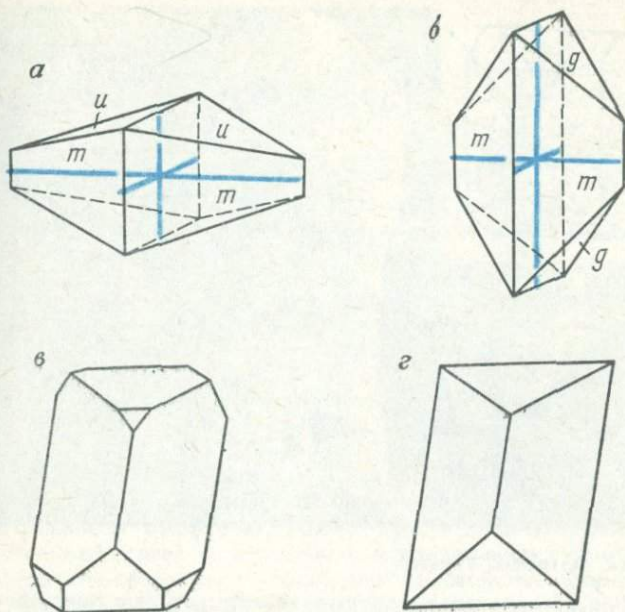


Рис. 13. Минералы моноклинной сингонии:  
а, б — арсенопирит; в, г — титанит

ществуют минералы псевдокубические (как ромбический пировскит), псевдогексагональные (моноклинные слюды и хлориты) и т. д.

Титанит, или сфен (рис. 13, в и г) — минерал уже типично моноклинный. На наших чертежах кристаллы титанита изображены «в профиль», чтобы подчеркнуть характерный перекосяк. Моноклинные и вообще низкосимметричные кристаллы нередко отличаются обилием простых форм; это видно на примере полевого шпата ортоклаза (рис. 14). Его кристаллы принадлежат к классу симметрии  $L_2PC$  и огранены в основном комбинацией пинакоидов  $p$ ,  $M$ ,  $x$ ,  $y$  и ромбической призмы  $T$ . Существуют и триклинные полевые шпаты. По внешнему облику они сходны с моноклинными, и разницу трудно уловить простым глазом. Триклинные полевые шпаты огранены только пинакоидами: призма  $T$  распадается на два пинакоида  $d$  и  $e$ .

Пора подытожить нашу работу и извлечь урок.

Как правило, исследовательский арсенал любителя минералов ограничен 10- или 20-кратной лупой. С ее помощью можно разглядеть мелкие кристаллы, форму и рельеф граней и другие не слишком мелкие подробности. Это немало. Мы с вами убедились, что форму отчетливо вы-

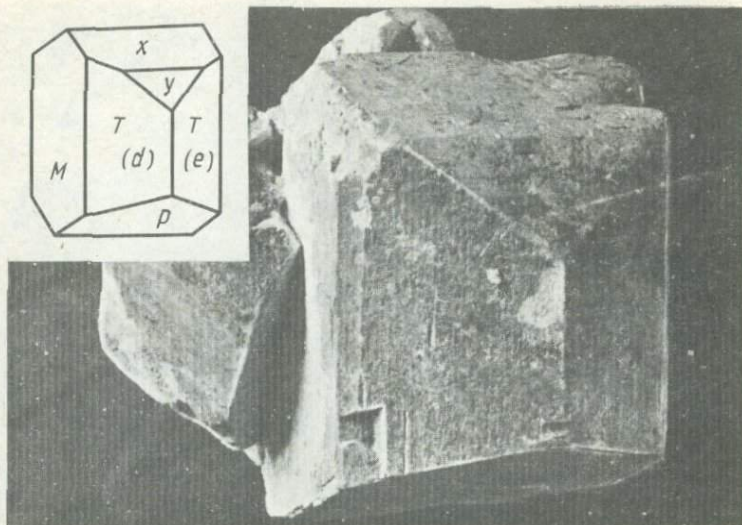


Рис. 14. Ортоклаз. Украина

раженных кристаллов можно анализировать и в непрофессиональных условиях, без специальных приборов. Вспомним еще раз, как мы это делали. Если перед нами был не чертеж, а реальный кристалл, то мы всегда начинали с того, что «идеализировали» его: отвлекались от случайных дефектов и искажений, дополняли недостающими, но угадываемыми частями и т. п. Иными словами, мы старались заменить кристалл «чертежом» идеального кристаллического многогранника, в котором мы затем находили элементы симметрии, и расчленяли многогранник на отдельные простые формы. Все эти приемы выполнялись на глаз, но тем не менее позволяли нам найти место кристалла на иерархической лестнице симметрии. Это исключительно важно, когда требуется определить неизвестный минерал: симметрия — первостепенный диагностический признак. В отдельных случаях нам даже удалось найти символы граней и простых форм.

Понимание основных законов формы кристаллических многогранников, практика и навык — вот по существу и все, что нужно для решения задач, типичных в работе любителя минералов.

Во всех рассмотренных примерах размеры кристаллов приведены к формату книжной иллюстрации. Такие кристаллы эффектны внешне и очень удобны для изучения. Но гораздо чаще и минералогу-профессионалу, и любителю приходится иметь дело с кристаллами меньших размеров. Большие кристаллы хорошего качества редки (см. таблицу).

# ДИАЛЕКТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ



Научно-техническая революция второй половины двадцатого столетия проложила дорогу широкому использованию кристаллов минералов — алмаза, слюды, горного хрусталя, исландского шпата и многих других. Потребность в них резко возросла и уже не всегда могла быть обеспечена добычей из природных месторождений. В связи с этим после второй мировой войны в промышленно развитых странах развернулись работы по искусственному получению технически важных кристаллов, и вскоре началось их производство в промышленных масштабах. Новые нужды практики вызвали существенный сдвиг и в научных исследованиях, при этом основное внимание было обращено на свойства, морфологию, процессы образования реальных кристаллов.

Классическое учение о форме и симметрии идеальных кристаллических многогранников к этому времени уже достигло завершения и стало логичной последовательной теорией. Тем самым был подготовлен фундамент для изучения кристаллов на современном уровне методами других наук — химии, кристаллохимии, физики твердого тела.

Учение о реальных кристаллах было подготовлено и накоплением обширного фактического материала — данных о самих кристаллах. С одной стороны, этот материал давали бесчисленные опыты по искусственной кристаллизации. С другой стороны, он накапливался и обобщался трудом многих поколений минералогов, в разное время и в разных странах собиравших сведения о природных кристаллах, условиях их образования и существования в природе. Не ограничиваясь описательной работой, передовые ученые проявляли заботу о сохранении самих бесценных свидетельств природы и создании золотого фонда науки — минералогических музеев и коллекций.

Крупнейшие минералогические сокровищницы мира возникли в XVIII — начале XIX вв. — в эпоху энергичного подъема горного дела, в обстановке живого интереса к минералам со стороны просвещенных слоев общества:

1716 г. — Минеральный кабинет Кунсткамеры Петра I — ныне Минералогический музей АН СССР в Москве, собрание которого насчитывает более 130 000 образцов минералов;

1753 г. — собрание минералов Британского музея естественной истории в Лондоне (180 000 образцов);

1757 г. — Музей Московского университета (с 1930 г. — Минералогический музей Московского геологоразведочного института; 65 000 образцов);

1773 г. — Музей Горного института в Ленинграде;

1781 г. — Музей природоведения университета им. Гумбольдта в Берлине;

1794 г. — Музей Национальной высшей горной школы в Париже (65 000 образцов);

1818 г. — Народный музей в Праге (120 000 образцов);

1912 г. — Музей Смитсоновского института в Вашингтоне (120 000 образцов).

Каждое из этих собраний возникло на базе частных коллекций и выросло до крупного национального достояния, включающего уникальные ценности научного и культурно-исторического характера.

В эпоху бурного развития горного дела началось и систематическое изучение природных форм минералов. Основоположником систематики и номенклатуры минеральных форм заслуженно считается знаменитый саксонский минералог А. Г. Вернер (1750—1817). Введенная им терминология во многом сохранилась до сих пор. А. Г. Вернер оставил после себя ценную коллекцию, которая легла в основу крупного минералогического собрания Горной академии во Фрейберге.

Во второй половине XIX в русские академики Н. И. Кокшаров (1818—1892) и П. В. Еремеев (1830—1899) выполнили скрупулезный труд по точному измерению огромного числа кристаллов минералов. Составленные ими сводки дали науке точную описательную основу, своего рода морфологические эталоны минеральных видов, заслужив высочайшую оценку современников и последователей.

До сих пор сохранил свое значение капитальный труд немецкого кристаллографа В. Гольдшмидта (1853—1933) — многотомный «Атлас кристаллографических форм», собравший все опубликованные к тому времени изображения кристаллов минералов.

Изучению форм природных кристаллов отдали много сил такие корифеи науки, как Е. С. Федоров (1853—1919), В. И. Вернадский (1863—1945), А. Е. Ферсман (1883—1945), А. К. Болдырев (1883—1946) и другие.

Профессор Московского университета М. А. Толстопятов (1836—1890), работавший главным образом в области кристаллогенезиса, стал одним из пионеров систематического изучения несовершенных и усложненных кристаллов. Интереснейшая коллекция М. А. Толстопятова в значительной части сохранилась и находится ныне в Минералогическом музее Московского геологоразведочного института.

Усложненные кристаллы в дальнейшем все более привлекали внимание минералогов. В середине нынешнего столетия в минералогии оформилось онтогеническое направление, связанное в отечественной науке с именами Г. Г. Леммлейна (1901—1966), Д. П. Григорьева и других ученых.

Черты реальностей заметно отличают кристалл от его идеализированной модели. Знакомство с реальными кристаллами ставит ряд таких вопросов, на которые геометрическая кристаллография не имеет ответов — это попросту не входит в ее задачи.

Как связаны между собой структура и внешний облик кристалла? Почему реализуются не все простые формы, допускаемые его классом симметрии? Почему одни минералы богаты, а другие бедны внешними формами? Почему в разных месторождениях один и тот же минерал выглядит по-разному? Чем вызваны искажения реальных кристаллов? Почему их грани не идеально гладки?

Все эти и другие подобные вопросы адресованы не столько геометрии, сколько физике и химии.

Кристалл появляется на свет не сразу, а в сложном и, как правило, длительном процессе кристаллизации. При этом он приобретает все свои качества. Отсюда вывод: единственный способ получить ответ на поставленные вопросы — изучать образование кристаллов. Теория кристаллообразования — отклик современной науки на актуальные запросы практики. Сегодня в этой области уже немало блестящих достижений. Но здесь далеко не все так же просто и ясно, как в учении о форме идеальных кристаллов. Вероятно, ученым еще долго надо будет трудиться над загадками реальных кристаллов, вскрывая роль все новых сил и обстоятельств, взаимодействующих при их образовании.

## РОЖДЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

### Родная стихия минералов

Наблюдать природную кристаллизацию удается нечасто. Но можно судить о ней по заслуживающим доверия косвенным данным, а также по тому, что известно о выращивании искусственных кристаллов. Лаборатория или завод, где создаются такие кристаллы, может до некоторой степени служить моделью природного кристаллообразования — в принципе минералы образуются теми же способами. Правда, искусственные кристаллы выращиваются при специально подобранных режимах и в специальных кристаллизаторах — изложницах, автоклавах, лабораторных сосудах. Минералы же растут в самых разных вместилищах — водоемах, полостях и трещинах горных пород и т. д., стенки которых сложены бесчисленными ранее образовавшимися индивидами. Последнее обстоятельство весьма существенно. На кристаллизацию сильно влияют и «посторонние» вещества, которые почти всегда присутствуют в минералообразующей среде. И, наконец, обстановка минералообразования динамична и переменчива. За тот долгий срок, что растут природные кристаллы, могут изменяться в широких пределах и неоднократно температура и давление, состав и концентрация среды кристаллизации — т. е. по существу все факторы, определяющие

ход процесса. Этапы спокойной эволюции минерального индивида сменяются резкими скачками. Все это, конечно, не может не сказаться на внешности конечного продукта — природного кристалла.

В образовании минералов исключительная роль принадлежит универсальному и вездесущему природному растворителю — воде. Именно водный раствор чаще всего служит минералообразующей средой; он содержит в растворенном виде либо сам минерал, либо те вещества, из которых минерал образуется в ходе какой-нибудь химической реакции.

Читатель может отнестись к этому утверждению скептически: широко известно, что вода минералы «не берет». Правда, не все: гипса в 1 л воды растворяется до 2 г, а галита даже до 350 г. Но эти и немногие другие исключения не меняют общего правила: в большинстве своем минералы в воде нерастворимы. Точнее говоря, почти нерастворимы, что, впрочем, не меняет дела.

Все это верно, но только в обычных, «комнатных» условиях. Минералы же часто образуются в глубоких недрах Земли, где господствуют совсем другие условия — высокие давления и температуры, а вода практически всегда содержит «сорастворенные» химически активные примеси. И это резко увеличивает растворимость минералов. Так, если в 1 л воды в комнатных условиях можно растворить не более 0,004 г кварца, то при 350°C — уже 2,5 г, а в щелочных растворах — даже до 70 г. Из таких растворов могут вырастать кристаллы значительных размеров, и занимает это не так уж много времени. Например, кристалл кварца может достигнуть длины 10—15 см всего за несколько месяцев (хотя в иной природной обстановке для этого может потребоваться гораздо больше времени). Растворимость других минералов тоже в той или иной мере увеличивается в экстремальных условиях недр Земли.

Диапазон минералообразования из водных растворов огромен: гигантские залежи галита, гипса, боратов, возникшие в поверхностных водоемах, и промышленные гидротермальные месторождения, образовавшиеся на значительных глубинах при температурах в сотни градусов и давлениях, превышающих атмосферное в сотни и тысячи раз; отдельные крохотные кристаллики в зонах окисления рудных месторождений и колоссальные сооружения карстовых пещер. Кристаллизация из водных растворов охватывает по меньшей мере 90% минеральных видов.

Минералы кристаллизуются также из расплавов, газов и паров. Расплавы обычно имеют глубинное происхождение, температура их может достигать 1500°C, а давление превышает атмосферное в тысячи раз. Кристаллизация происходит по мере остывания расплава, оказавшегося в верхних, более холодных зонах Земли. Если остывание идет медленно, вы-

растают крупные кристаллы. Так бывает, когда большие массы расплава остывают на значительной глубине — это может продолжаться многие тысячи и даже миллионы лет. При вулканических извержениях расплав изливается на земную поверхность, вследствие чего он быстро остывает. В этом случае образуется множество микроскопических кристаллов или однородная стекловидная масса. Из расплавов кристаллизуется не более 20% минеральных видов, но на их долю приходится свыше 90% массы земной коры. Сюда относятся такие породообразующие минералы, как оливин, слюды, пироксены, кварц, нефелин, многие промышленно важные минералы — хромит, пентландит и др. Большинство минералов, кристаллизующихся из расплавов, образуется также из природных водных растворов.

Из газов и паров — главным образом вулканического происхождения — кристаллизуется не более 2,5% минеральных видов. Некоторые из них — сера, нашатырь, борная кислота — образуют промышленные месторождения. Температура кристаллизации может достигать 1000°C, процесс идет быстро, и в отдельных случаях выпадает возможность наблюдать его собственными глазами. Так, в 1817 г. немецкий минералог И. Ф. А. Брейтгаупт сделал сенсационное сообщение об образовании всего за 10 дней метровой толщи гематита, наблюдавшемся им при извержении Везувия.

Кристаллизация в твердой среде — явление редкое. Формально сюда относят и так называемые метакристаллы, образовавшиеся в проницаемой и податливой горной породе (например, метакристаллы пирита в сланце). Метакристаллы растут за счет питания из тонкой пленки раствора, расположенной на контакте с вмещающей породой.

## Мотивы и обстоятельства

Итак, кристаллы минералов возникают преимущественно в жидких и газообразных средах, в которых кристаллизующееся вещество находится в виде отдельных частиц — атомов, ионов, молекул. Частицы обладают большой кинетической энергией, совершая быстрые беспорядочные движения. Время от времени «нужные» частицы, случайно столкнувшись, сцепляются друг с другом, образуя зародыш — микроскопический клочок будущей структуры, всего несколько элементарных ячеек. Такой клочок уже мог бы самостоятельно расти, присоединять к себе новые частицы и со временем превратиться в настоящий кристалл, — если бы его не расшатывали собственные тепловые колебания, которые еще усиливаются бомбардировкой свободными частицами. Из-за этого зародыш рано или поздно распадается, и частицы разбегаются в раз-

ные стороны, возвращаясь в окружающую среду. Чтобы началась кристаллизация, надо дать зародышу хорошие шансы на выживание.

Для этого зародыш должен достигнуть достаточно большого размера: тогда силы связи между частицами воспрепятствуют его разрушению. Такая возможность появляется с понижением температуры расплава, с повышением концентрации раствора. В первом случае уменьшаются тепловые колебания, во втором — увеличивается вероятность встречи частиц друг с другом. Благодаря этому зародыш достигает той критической величины, при которой ему уже не грозит преждевременная гибель. Тогда он продолжает расти — идет кристаллизация.

### Крупнейшие известные кристаллы некоторых минералов

Минерал	Размер кристалла (в см) или его масса	Место находки
Алмаз	9; 605 г	Кимберли, ЮАР
Сера	30	Водинское, Поволжье, СССР
Пирит	50	Македония, Греция
Сфалерит	15	Забайкалье, СССР
Галенит	25	о. Мэн, Великобритания
Антимонит	60	о. Сикоку, Япония
Галит	100	Аллерталь, ФРГ
Флюорит	200	Нью-Мексико, США
Куприт	4	Тсумеб, Намибия
Хризоберилл	10	Урал, СССР
Анализ	4,5	Бинненваль, Швейцария
Корунд	61; 152 кг	Трансвааль, ЮАР
Гематит	10	о. Эльба, Италия
Кварц	70 т	Казахстан, СССР
Кальцит	600	Эксифьорд, Исландия
Родохрозит	12	Колорадо, США
Церуссит	60	Тсумеб, Намибия
Азурит	25	Там же
Барит	45 кг	Уэстморленд, Великобритания
Гипс	800	Чили
Вивианит	150	Анлуа, Камерун
Альмандин	1 т	Суннфьорд, Норвегия
Уваровит	2	Оутокумпу, Финляндия
Аксинит	22	Баия, Бразилия
Данбурит	30	Дальнегорск, Приморье, СССР
Берилл	1800; 380 т	о. Мадагаскар
Изумруд	20	Урал, СССР
Эпидот	100	Зеленцовская копь, Южный Урал, СССР
Микроклин	1000	Мосс, Норвегия

Шансы на появление жизнеспособных зародышей значительно возрастают в присутствии затравок — посторонних зернышек, пылинок и пр. За счет поверхностных сил затравка собирает (адсорбирует) нужные частицы, сближает их и тем самым облегчает начало кристаллизации. В природной обстановке центры кристаллизации чаще всего возникают именно на затравках, которыми служат зерна вмещающей породы и особенно индивиды того же минерального вида.

Начавшаяся кристаллизация в конечном итоге приводит к образованию кристаллов более или менее значительной величины. Но рано или поздно изменение внешних условий прекращает кристаллизацию, а иногда даже вызывает растворение (расплавление) выросших кристаллов. Вслед за кристаллизацией данного минерала может начаться осаждение других. Их индивиды занимают оставшееся место и промежутки между ранними, уже выросшими кристаллами.

Наиболее крупные природные кристаллы принадлежат к редким находкам. Примеры таких кристаллов приводятся в таблице.

Итак, жизнь кристалла — природного или искусственного — начинается с зарождения и проходит различные этапы роста, а иногда и изменения. Образование кристалла — это самопроизвольный переход вещества из растворенного, расплавленного или газообразного состояния в состояние твердого тела с регулярным — кристаллическим — строением.

Почему происходит кристаллизация? Вопрос может показаться неожиданным только на первый взгляд: ведь должна же существовать какая-то причина, побуждающая сонм разрозненных, беспорядочно мечущихся частиц перегруппироваться в упорядоченный строй кристаллического тела!

На эту причину указывает очень важный физический принцип, утверждающий, что при определенных условиях (в которых обычно протекает кристаллизация) всякая совокупность (система) тел самопроизвольно стремится к состоянию с минимальной свободной энергией\*. Свободная энергия — это та часть внутренней энергии системы, за счет которой может быть совершена работа, тогда как остальная энергия может перейти только в теплоту. Принцип минимизации свободной энергии надо понимать так: при отсутствии внешних воздействий всякое состояние неустойчиво, пока существует возможность перехода в другое состояние, в котором свободная энергия меньше. Лишь в состоянии с минимально возможной (в данных условиях) свободной энергией система приходит в равновесие — перестает испытывать тенденцию к изменениям. Камень «сам собой» скатывается с горы именно потому, что уменьшается свободная энергия (в данном случае потенциаль-

\* Принцип минимизации свободной энергии вытекает из фундаментального закона природы — второго начала термодинамики.

ная энергия в поле тяготения). Освободившаяся энергия расходуется на движение камня, работу против сил трения, работу расталкивания других камней и воздуха и их разогрев.

Иллюстрацией принципа минимизации свободной энергии может служить и образование кристалла. Представим себе, например, пересыщенный раствор ионов натрия  $\text{Na}^+$  и хлора  $\text{Cl}^-$  — назовем это состоянием I. Как известно, из такого раствора могут выпадать кристаллы галита  $\text{NaCl}$ , причем кристаллизация идет до тех пор, пока концентрация раствора не снизится до уровня насыщения. Иначе говоря: если не предпринимать никаких действий, то система самопроизвольно приходит к состоянию II, когда она состоит из кристаллов и насыщенного раствора. Заняв фиксированные положения в кристаллической решетке и соединившись друг с другом, ионы теряют большую часть своей кинетической энергии и взаимно «гасят» энергию химических связей. С другой стороны, образование кристалла требует затраты энергии на перенос частиц в одно место и на образование поверхности кристалла. Но общий итог складывается все же в пользу кристаллизации: в состоянии II свободная энергия системы меньше, чем в состоянии I. Разница уходит на работу образования кристалла и частично рассеивается в виде тепла. Вместо кинетической энергии частиц, движущихся в растворе, остается лишь сравнительно небольшая энергия колебаний частиц в узлах решетки; нескомпенсированные связи сохраняются только на поверхности кристалла. Поверхность растет медленнее, чем масса и объем, а значит, доля поверхностной энергии по мере роста сокращается.

Таким образом, кристаллизация идет автоматически, самопроизвольно просто потому, что существует возможность уменьшения свободной энергии, и представляет собой в сущности один из способов ее уменьшения. Кристаллизация энергетически «выгодна»: она приводит к отдаче энергии системой, и тем большей, чем крупнее кристалл. Кристаллизация может идти только при определенных условиях: в пересыщенных растворах, переохлажденных расплавах.

Но при детальном рассмотрении дело обстоит несколько сложнее. Для полноты картины следовало бы преодолеть два логических затруднения. Первое связано с самопроизвольным зарождением кристалла. Пока зародыш еще не достиг критического размера, доля его поверхностной энергии столь велика, что на образование поверхности затрачивается больше энергии, чем освобождается за счет консолидации частиц. Возникновение зародыша и начальная фаза его роста приводят не к уменьшению, а к увеличению свободной энергии. Правда, по отношению ко всей системе увеличение ничтожно, но это не меняет дела: с точки зрения минимизации свободной энергии возникновение зародыша — парадокс. Принцип есть принцип.

В «оправдание» можно сказать, что принцип минимизации энергии лишь мотивирует поведение системы большого числа частиц и определяет генеральную тенденцию процесса, но не распространяется на поведение отдельных частиц в отдельные моменты времени. Что же, собственно, происходит с этими отдельными частицами? Беспорядочно двигаясь в жидкости или газе, они непрерывно и случайным образом обмениваются энергией. В результате небольшая совокупность частиц на какой-то миг становится обладательницей энергии, достаточной для образования зародыша. К длительному самостоятельному существованию такой зародыш, может быть, и не способен, но присоединение следующих частиц доводит его до критического размера раньше, чем он распадается. Так в самом начале кристаллизации ей на помощь приходит случай.

По сути дела, все это закономерно. Всякий самопроизвольный процесс требует первоначального толчка, кратковременной затраты небольшой энергии. Камень не покатится вниз сам, пока его не подтолкнут; спичка не загорится сама, пока ею не чиркнут о коробок. Первоначальный толчок развязывает силы, уже готовые к действию. Для кристаллизации таким толчком служит возникновение зародыша.

В природных условиях, как уже отмечалось, зарождение кристаллов чаще всего облегчается наличием затравок.

Другое затруднение устранить сложнее, и касается оно самого для нас важного — формы кристалла. Стремясь к равновесному состоянию, растущий кристалл должен был бы «выбирать» себе и соответствующую равновесную форму, которая обеспечивала бы ему минимум свободной энергии. Такая форма во время роста сохранялась бы без изменений. Получается, что принцип минимизации свободной энергии предопределяет для каждого вещества раз и навсегда одну единственную кристаллическую форму.

Но дело как раз в том, что в действительности наблюдается вовсе не единственная форма. Принцип минимизации не может этого объяснить потому, что указывает лишь направленность, конечную цель процесса, не входя в его детали и длительность протекания. А между тем, система не просто испытывает тенденцию к минимизации свободной энергии, но стремится достигнуть минимума как можно скорее. И бывает так, что вторая тенденция — к максимальной скорости процесса — как бы наступает на пятки первой. Система чуть-чуть «ошибается», но такой ценой кристалл, приспособляясь к разнообразным обстоятельствам существования, реализует весь возможный темп роста. Как видим, процесс кристаллизации отчетливо носит диалектический, внутренне противоречивый характер. И именно этим в конечном счете обусловлено все разнообразие форм роста реальных кристаллов.

## Как растет кристалл!

Каким образом извлекает он частицы из окружающего раствора, расплава, газа? Где и в каком порядке оседают частицы? Не имея возможности увидеть собственными глазами, как все это происходит, ученые ждут ответа от теории роста кристаллов. Задача теоретика — раскрыть сущность явлений роста и предложить их количественное описание, своего рода прогноз. Далее за дело берется экспериментатор: он определяет опытным путем те или иные характеристики (скажем, скорость кристаллизации), сравнивает их с прогнозом теории и таким образом проверяет ее правильность. Если теория окажется верной, можно спросить ее и о том, что не удастся узнать непосредственно из опыта.

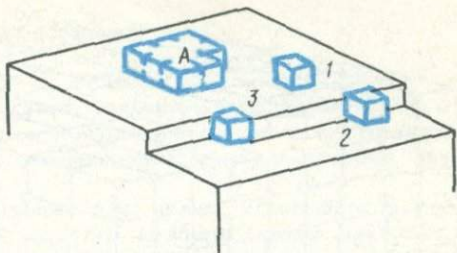
Со времени первых попыток научного изучения кристаллов было предложено много теорий роста, но большинство их сейчас представляет только исторический интерес. Мы упомянем лишь о тех идеях, которые выдержали проверку временем и взяты учеными на вооружение.

Важнейшие энергетические закономерности, управляющие процессами зарождения и роста кристаллов, были установлены в конце прошлого века Дж. У. Гиббсом (1839—1903) — выдающимся американским физиком, одним из основоположников термодинамики. В 20-х годах нынешнего столетия немецкий физик М. Фольмер теоретически обосновал самопроизвольное зарождение и вычислил его вероятность. Он высказал также мысль, что на поверхности растущего кристалла возникает особый пограничный слой частиц, которые кристалл адсорбирует из питающего раствора, расплава или пара. Частицы «ползают» по поверхности кристалла, пока не найдут своего места на растущих гранях. Наличие адсорбционного слоя вносит в процесс кристаллизации определенные особенности.

В 1927 г. В. Коссель в Германии и И. Н. Странский в Болгарии занялись вопросом о том, в каком порядке частицы присоединяются к кристаллу. Благодаря идеально регулярному строению кристалл должен нарастать идеальными плоскими слоями — ритмично, слой за слоем. На рис. 15 показаны способы осаждения отдельной частицы (условно изображенной в виде кубика): 1 — на плоскость грани; 2 — в двугранный угол, образованный краем незаконченного слоя частиц; 3 — в трехгранный угол, образованный незаконченным крайним рядом частиц.

Последний способ предпочтителен, так как частица прочно связывается с кристаллом сразу тремя сторонами, что обеспечивает наибольшее сокращение свободной энергии. Поэтому достройка ряда получает энергетическое преимущество, и пока ряд достраивается, частицы оседают здесь гораздо чаще,

Рис. 15. Различные способы присоединения частицы к растущему кристаллу. А — двумерный зародыш

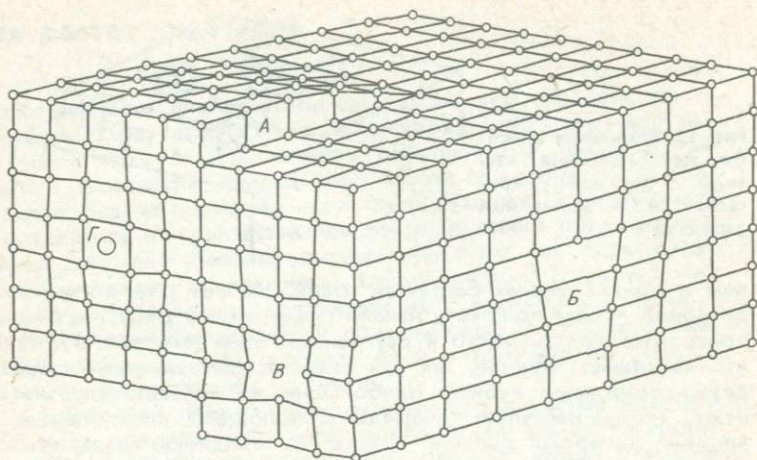


чем в других местах растущей грани. Но вот ряд достроен до конца. Чтобы положить начало следующему ряду, частице приходится занять место в двугранном угле (см. рис. 15, 2), что несколько труднее, так как связь осуществляется только двумя сторонами кубика. Наибольшие же трудности возникают, когда наступает очередь следующего слоя, первая частица которого должна осесть на гладкую грань (см. рис. 15, 1). Связь с кристаллом настолько слаба, что эта одиночная частица вообще не в состоянии удержаться на грани, и сооружение слоя может начаться лишь после того как несколько частиц консолидируются в так называемый двумерный (однослойный) зародыш. Для этого требуется дожидаться, пока волей случая на грани окажется одновременно нужное число частиц в близком соседстве друг с другом. Иначе говоря, при зарождении новых слоев возникают паузы, и они тем длиннее, чем ниже пересыщение. Паузы в основном и определяют скорость кристаллизации в целом.

Теорию Косселя—Странского отличают последовательная логика и безукоризненные расчеты. И верховный судья всякой теории — эксперимент — подтверждает, что при достаточно высоких пересыщениях рост кристалла действительно идет в соответствии с теоретическим прогнозом. Но при низких пересыщениях кристаллы растут в сотни и тысячи раз быстрее, чем предсказывает теория. Они продолжают расти и при таких низких пересыщениях, при которых теория считает рост совсем невозможным. При малых пересыщениях кристаллы растут вопреки теории.

Физик всегда мечтает о такой теории, которая при всех обстоятельствах указывала бы правильную дорогу, объясняя явление с единой точки зрения. Но природа оставляет на это все меньше надежд. Она неизменно оказывается сложнее схемы.

Впрочем, не следует думать, что трудности послойного роста дискредитируют теорию Косселя—Странского в целом — ведь в большом диапазоне условий теория верна. Но с помощью одной лишь идеи послойного роста не удастся представить целиком весь «механизм» кристаллизации. Очевидно, эта идея должна быть чем-то дополнена.



**Рис. 16. Дефекты кристаллических структур:** винтовая дислокация (А), краевая дислокация (Б), вакансия (В), внедрение атома в междоузлие (Г)

Это хорошо понимал английский физик-теоретик Ф. Франк. Он предположил, что причина неудач теории Косселя—Странского заключена в ее исходном постулате об идеальной структуре кристалла. Рост идет беспрепятственно, пока на грани происходит достройка слоя и имеется ступенька, к которой легко пристраиваются частицы; слабое место теории — неизбежное исчезновение ступеньки и необходимость ее возобновления. В 1949 г. Франк высказал смелую мысль, что в действительности на грани имеется неисчезающая ступенька, навивающаяся на нее не плоские, а спиральные слои. Существование такой ступеньки Франк приписал нарушению регулярности строения реального кристалла, которое он назвал **винтовой дислокацией**. Идея Франка столь блестяще подтверждалась опытом, что физики принялись искать дислокации и вскоре получили неопровержимые доказательства их существования.

Винтовую дислокацию можно представить как частичный сдвиг в кристалле (рис. 16, А). Двугранный угол, который она образует на растущей грани, при встраивании новых частиц не исчезает, а лишь перемещается по винтовой поверхности, и кристалл наращивается непрерывным спиральным слоем — **надобность в зарождении нового слоя отпадает**. Прямая, вокруг которой закручивается спиральный слой, называется осью дислокации.

## Минусы и плюсы дефектов

Получается, что своим существованием кристаллы обязаны собственным недостаткам — нарушениям, дефектам структур. Но как же растут «нормальные» кристаллы, в которых нет нарушений?

Парадоксальность ситуации дает повод поговорить о дефектах кристаллических структур вообще. Кроме винтовых, бывают краевые дислокации — дефект состоит в отсутствии части плоской сетки (рис. 16, Б). В кристаллах обычно имеются различные точечные дефекты: вакансии — пустые, незанятые узлы (рис. 16, В) и атомы внедрения в междоузлия кристаллической решетки (рис. 16, Г); недостающие или лишние валентные электроны. Известны разного рода объемные и поверхностные дефекты.

В обычном понимании «дефект» — это нечто случайное, отклонение от общего правила, от нормы. Так на первый взгляд обстоит и с дефектами структур. Энергетический минимум кристалла, а значит, его равновесность, стабильность обеспечиваются регулярностью строения. В дефектах же локализуется свободная энергия, а потому их существование кажется незаконным, ненужным кристаллу, случайной оплошностью в построении кристаллической структуры. А раз так, то тем или иным способом дефектов можно избежать.

Но оказывается, что такого способа нет. Загвоздка в самой малости: кристалл имеет температуру, т. е. обладает запасом тепловой энергии. Она раскачивает частицы, не давая им неподвижно покоиться в узлах решетки. Колеблясь, частицы и в кристалле продолжают обмениваться энергией. Время от времени какая-нибудь из них, получив достаточный энергетический импульс, выскакивает из узла, оставляет на своем месте вакансию и внедряется в междоузлие. С понижением температуры колебания уменьшаются, но полностью не исчезают. Допустим, нашелся бы способ гасить слишком сильные колебания, но это было бы возможно лишь ценой дополнительных (пусть косвенных) затрат энергии и еще дальше увело бы от энергетического минимума. Выходит, что дефекты неизбежны и, как это ни странно, даже нужны. Факт существования дефектов закономерен, хотя их положение в кристалле и численность более или менее случайны.

Поскольку точечные дефекты служат своего рода стоками энергетических излишков, их концентрация возрастает с температурой. При комнатных условиях кристаллы содержат по одной вакансии на каждые  $10^{12}$ — $10^{14}$  атомов; при  $350^\circ\text{C}$  одна вакансия приходится уже на  $10^5$ , а при  $650^\circ\text{C}$  — всего на каждую сотню атомов.

Дислокации возникают в скоплениях точечных дефектов, при неполном совпадении структур, когда в процессе быстро-

го роста кристалл присоединяет целый комплекс частиц, при неравномерном росте, механических напряжениях, тепловых деформациях и т. д. Реальный кристалл весь пронизан дислокациями: на каждом квадратном сантиметре сечения их насчитывается обычно десятки тысяч, а иногда и в миллионы раз больше. Но по сравнению с правильно расположенными атомами дефекты очень немногочисленны, и на форме кристаллов их присутствие обычно не отражается. От температуры количество дислокаций зависит мало.

По выражению видного советского кристаллографа Н. Н. Шеф-тáля, «кристалл в первую очередь стóремитса расти, во второ-ую — расти наиболее совершенным». Бездефектная структура кристаллов — такая же идеализация, как и совершенно симметричная форма. Абсолютно «хороших» кристаллов по-просту не бывает и, как мы убедились, принципиально не может быть.

Следовательно, структурные дефекты можно рассматривать на-равне с другими свойствами реальных кристаллов. И только ли «дефектными» делают они кристалл?

Дефекты резко снижают прочность кристаллических тел. Изба-вившись от дислокаций, можно было бы за счет увеличения проч-ности многократно сократить расход материалов и массу конструк-ций, а это означало бы небывалые технические возможности и пере-ворот во всех сферах деятельности человека, равного которому история еще не знала. Дефекты, особенно поры и микротрещины, заметно влияют и на химические свойства кристаллических тел, снижая их стойкость к коррозии. Скопления дефектов ухудшают пьезооптическое сырье, лазерные материалы и т. п.

Вместе с тем многими своими интересными и полезными каче-ствами кристаллы обязаны именно структурным дефектам. Дефекты отлично «работают» в полупроводниках, придавая им широчайший спектр тех особых свойств, использование которых вызвало техни-ческую революцию с далеко идущими экономическими и социаль-ными последствиями. С дефектами связано такое важное качество минералов, как окраска: в половине случаев она обусловлена неко-торыми точечными дефектами. Дефекты способны перемещаться: при температуре, близкой к точке плавления, скорость перемещения вакансий достигает нескольких метров в секунду. Правда, это движе-ние хаотично и больше напоминает топтание на месте (за одну секунду вакансия смещается всего на несколько микрометров), но все же оно делает принципиально возможной диффузию атомов, а следовательно, перекристаллизацию в твердом состоянии.

Об огромном значении винтовых дислокаций для роста кристаллов читатель уже знает. Дефекты при определенных условиях могут оказывать влияние и на их внешний облик. Ведь и сам предмет нашего обсуждения — поверхность крис-талла — не что иное как нарушение регулярности структуры, т. е. дефект.

## КРИСТАЛЛЫ МЛАДШЕГО И СТАРШЕГО ВОЗРАСТА

Перейдём к вопросу о том, как «взрослеют» кристаллы, как окончательно формируется их «внешность».

### Небезынтересные подробности о равновесных формах

Напомним, что среди всех возможных форм кристалла равновесная занимает исключительное положение: только она обеспечивает минимум поверхностной энергии. Естественно предположить, что такая форма должна быть особенной и в геометрическом отношении.

В 1901 г. русский кристаллофизик Г. В. Вульф доказал следующую теорему: расстояния граней равновесной формы от центра кристалла пропорциональны плотностям поверхностной энергии этих граней. Из теоремы Вульфа вытекает, что на равновесном кристалле грани одной простой формы равноудалены от центра в силу их физической идентичности, в том числе и по плотности поверхностной энергии. А поскольку это касается всех простых форм данного кристалла, то, как нетрудно заключить, искажения симметрии на нем отсутствуют. Равновесный кристалл является правильно ограниченным. (Из этого, разумеется, не следует, что всякий правильно ограниченный кристалл равновесен.) Так теорема Вульфа перебрасывает мостик от физических свойств равновесных кристаллов к их геометрической форме. В равновесной форме кристалл наиболее компактен, обладает наименьшей поверхностью и простейшим ограничением.

В принципе равновесную форму можно вычислить, располагая данными лишь о самом кристаллическом веществе. Иное дело — реальные формы роста. Множество обстоятельств диктует компромисс между двумя тенденциями растущего кристалла: к быстрому росту и к совершенству.

### Соревнование граней

Рост кристалла можно представить как перемещение в пространстве его границ — граней. Они раздвигаются в разные стороны от центра, и кристалл увеличивается в размерах. Перемещение грани за единицу времени в направлении, перпендикулярном ее плоскости, — это скорость роста грани. Каждая грань нарастает со своей скоростью.

На рис. 17 изображены сечения двух растущих кристаллов. Вначале кристаллы были одинаковыми. Но далее рост шел по-разному: на левом кристалле грань  $m$  нарастала быстрее смежных с нею граней  $p$  и  $s$ , а на правом, наоборот, медленнее. Со временем кристаллы стали все более отличаться друг от друга. На левом кристалле грани  $p$  и  $s$  постепенно станови-

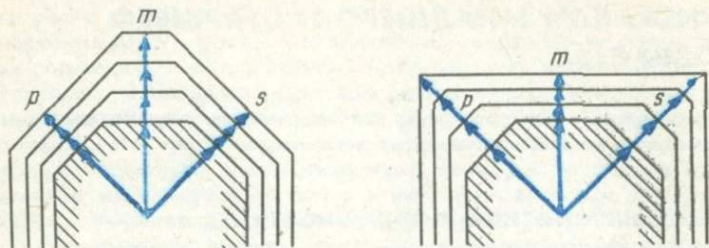


Рис. 17. «Соревнование» граней. На левом кристалле грань  $m$  растет быстрее граней  $p$  и  $s$ , на правом — медленнее

лись преобладающими, а грань  $m$  выклинивалась — сокращалась в размерах. На правом кристалле, напротив, преобладающей становилась грань  $m$ , а выклинивались и в конце концов исчезли грани  $p$  и  $s$ .

Таким образом, при росте кристалла происходит своего рода соревнование: одни грани разрастаются и как бы вытесняют другие. Чрезвычайно важно уяснить, что это — «соревнование наоборот»: увеличиваются в размерах как раз те грани, которые растут медленно. Чем сильнее спешка, тем больше риск сойти с дистанции.

Мы пришли к важнейшему результату: ограничение и габитус кристалла определяются медленно растущими гранями. На это положение мы будем постоянно ссылаться в дальнейшем.

Выяснить, от чего зависит форма кристалла — значит, найти причины, управляющие скоростями роста граней. Для равновесных кристаллов соотношение скоростей роста различных граней постоянно и определяется плотностями поверхностной энергии. Во всех остальных случаях это соотношение зависит не только от свойств самого кристалла, но и от внешних причин.

## Победители и отстающие

Теперь мы займемся прогнозом «соревнования», но прежде надо ознакомиться с составом участников. Он очень пестр: представлены всевозможные кристаллические структуры. Некоторые кристаллические вещества построены из целых молекул. Среди минералов таких немного: лед, сера, реальгар и еще несколько названий — в общей сложности не более 0,5% царства минералов. В подавляющем большинстве минералы строятся из ионов — положительных (катионов) и отрицательных (анионов). Ионная связь обусловлена электростатическим притяжением зарядов противоположного знака.

Структура ионного кристалла состоит из чередующихся анионов и катионов, расчленить ее на отдельные молекулы невозможно (см. рис. 1, а). Анионы могут быть сложными, состоящими из нескольких ионов с отрицательным суммарным зарядом. Катионы обычно мельче анионов и размещаются в пустотах их плотной упаковки. Галит, флюорит, другие галогениды — минералы с типично ионной структурой.

Сравнительно немногочисленные природные кристаллы состоят из нейтральных атомов, соединенных ковалентными связями. Такая связь осуществляется валентными электронами, принадлежащими обоим атомам. Важнейшая особенность ковалентной связи — ее направленный характер. Ковалентная связь возможна между одинаковыми или очень близкими по свойствам атомами — в кристаллах алмаза и других самородных неметаллов. В кристаллах большинства минералов характер связей смешанный — ионно-ковалентный.

Наконец, в самородных металлах структуры построены из катионов, сцементированных «электронным газом» — обобщественными, блуждающими по структуре валентными электронами. Если бы не электронный газ, структура не могла бы существовать как целое из-за взаимного отталкивания катионов.

Как же поведут себя в соревновании разные грани одного кристалла?

Очевидно, прежде всего должны зарости неровности вроде тех, что изображены на рис. 1, в. В процессе кристаллизации они играют важную роль удобнейших «мест роста» — ловушек, которые легко удерживают частицы.

После зарастания неровностей соревнование продолжается уже между гладкими гранями, растущими медленнее. Такая грань наращивается, как говорят кристаллографы, «повторимым ходом»: частица укладывается в трехгранный угол, подготовленный предыдущим ходом, и подготавливает тем самым место для следующего хода (см. рис. 15, 3). Повторимый ход — чистый энергетический выигрыш.

Пока на грани есть ступенька, т. е. при наличии винтовой дислокации и при достройке плоского слоя по Косселю—Странскому, отложение частиц повторимым ходом идет беспрепятственно, и скорость ограничивается лишь подачей материала — притоком частиц из окружающей среды. Появление нового слоя, как уже говорилось, связано с образованием первого островка — двумерного зародыша. Возникающая при этом пауза замедляет кристаллизацию. Следовательно, быстрее должны расти те грани, на которых зарождение нового слоя происходит с наименьшими затруднениями. Что это за грани? Проанализировав задачу, В. Коссель нашел, что ответ зависит от структуры плоских сеток и типа химических связей. Присоединяясь к ковалентному кристаллу, частица со стороны любой его грани испытывает одно и то же по характеру дей-

ствие. В случае ионного кристалла частица испытывает противоположное действие от разных граней в зависимости от того, построены они из катионов, анионов или тех и других. Расчеты приводят к следующим результатам: на кубическом ковалентном кристалле грани ромбододекаэдра  $\{110\}$  нарастают быстрее граней куба  $\{100\}$ , а стало быть, выклиниваются в пользу последних; для ионных и металлических кристаллов картина зависит конкретно от структуры плоских сеток.

Согласно модели Косселя, на ковалентном кристалле островок-зародыш возникает в середине грани, а на ионном — вблизи вершины или ребра. Слои ковалентных кристаллов разрастаются от центра грани к ее краям, а ионных — от вершин и ребер к центру.

## Кто же медленнее!

Итак, грани могут расти по-разному, и этим прогноз соревнований сильно осложняется. Желательно найти более непосредственное соответствие между структурой и формой кристаллов.

Еще задолго до появления современных теорий роста такую попытку предпринял создатель учения о кристаллических решетках О. Браве. Правило Браве гласит, что медленнее всех растут грани с высокой плотностью упаковки частиц. В самом деле, чем выше плотность частиц в сетке, тем выше ее самонасыщение, а стало быть, тем труднее присоединяются к ней новые частицы. Плотнупакованные грани — это обычно грани с невысокими кристаллографическими индексами. Согласно правилу Браве, именно они должны преобладать в огранении кристаллов старшего возраста, что в основном и наблюдается в действительности.

Но вот, например, на кристаллах кварца должны были бы преобладать как самые плотнупакованные грани пинакоида  $\{0001\}$ , однако на природных кристаллах кварца пинакоид вообще ни разу не был обнаружен, хотя этот минерал изучен очень хорошо. Есть и другие исключения подобного рода; их немного, и нельзя утверждать, что они компрометируют правило Браве. Однако они заставляют думать, что истина где-то рядом. Есть у правила Браве еще один недостаток: его трудно применять к сложным структурам, в которых иногда вообще нельзя найти плотнупакованные сетки.

Когда были расшифрованы структуры важнейших минералов и искусственных веществ, а кристаллохимические представления прочно вошли в науку, возникла идея связать облик кристалла с анизотропией химических связей. Согласно правилу академика В. С. Соболева, важнейшие (габитусные) грани кристалла развиваются параллельно направлениям наиболее прочных связей в его структуре. Проиллюстрируем это при-

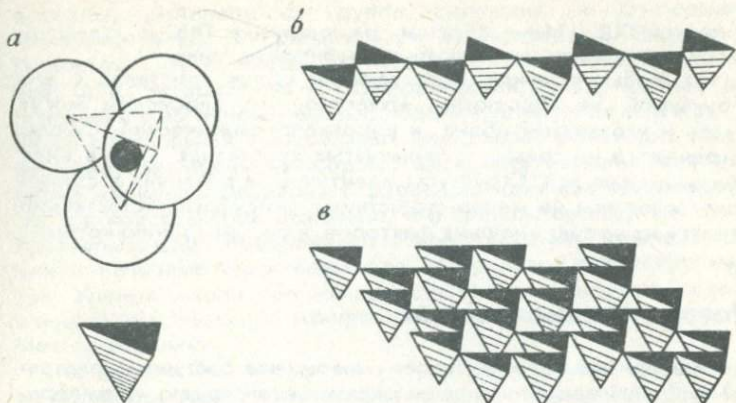


Рис. 18. Кристаллические структуры силикатов: а — кремнекислородный тетраэдр; б — цепочный структурный мотив пироксена; в — листовая (слоистый) структурный мотив слюды

мерами из класса силикатов — минералов разнообразного облика с очень характерными структурными особенностями.

Все силикаты строятся из кремнекислородных тетраэдров — комплексных анионов  $\text{SiO}_4^{4-}$  (рис. 18, а). Через общие атомы кислорода они могут связываться друг с другом, образуя различные «структурные мотивы». Связь атомов кремния и кислорода в тетраэдрах  $\text{SiO}_4^{4-}$  и между тетраэдрами исключительно прочна, минералоги даже видят в ней силу, «цементирующую» вещество земной коры, в которой на долю силикатов приходится свыше 90%. Пироксены — минералы с общей формулой  $\text{AB}[\text{Si}_2\text{O}_6]$  — построены из цепочек кремнекислородных тетраэдров (рис. 18, б). Цепочки расположены параллельно друг другу и связаны между собой катионами металлов А и В. Соответственно кристаллы пироксенов — диопсида, эгирина, сподумена и др. — обычно отличаются призматическим габитусом с удлинением вдоль структурных цепей. В слюдах (мусковит, флогопит и др.) кремнекислородные тетраэдры соединены в слои (рис. 18, в), а кристаллы обычно имеют таблитчатую форму и отличаются весьма совершенной спайностью по пинакoidу. Плоскости спайности в кристаллах слюд проходят между слоями тетраэдров  $\text{SiO}_4^{4-}$ , где связи слабее.

Дальнейшее развитие кристаллохимический подход получил в так называемой теории ПЦС, предложенной в середине 50-х годов голландскими учеными П. Хартманом и В. Пердоком. Согласно этой теории, внешнее ограничение кристалла определяется сочетаниями периодических цепей связей (ПЦС) между атомами или ионами. Самонасыщение плоской сетки, а следовательно скорость ее нарастания и роль в огранении кристалла, зависят от количества и

сочетания ПЦС. Таким образом, расположение ПЦС в структуре кристалла позволяет предсказать его габитусные грани.

Но любые правила, связывающие облик кристалла с его структурой, не абсолютны. Известно, что пироксены могут иметь и игольчатый облик, и короткопризматический. Слюды встречаются не только в таблитчатых кристаллах, но и в виде призм и даже игл. Структуры идентичны, а различия в форме кристаллов тем не менее существуют, и немалые. Естественно отнести их за счет внешних факторов, к рассмотрению которых мы переходим.

## Погода и самочувствие

Множество наблюдений говорит о том, что растущие кристаллы чувствительны к «погоде» окружающей среды — температуре, давлению, химическому составу. Очевидно, здесь и надо искать причины как различий кристаллов одного и того же минерала, выросших в разных природных условиях, так и эволюции формы кристалла в процессе его роста.

Но чтобы проследить эту эволюцию, нужны убедительные факты — надежные сведения о форме кристаллов и условиях кристаллизации на различных ее этапах. Иначе все рассуждения останутся всего лишь рассуждениями.

О своем далеком прошлом кристалл может рассказать сам. Как он выглядел раньше, можно представить по зонам роста, некогда бывшим внешней поверхностью кристалла. На прозрачных кристаллах зоны роста часто заметны в виде «фантомов», выделяющихся окраской или включениями; рентгеновское или гамма-облучение позволяет обнаружить и невидимые зоны роста.

Информацию о физико-химических условиях кристаллизации хранят включения-пузырьки. Во время роста кристалл захватывал капельки раствора, над которыми после охлаждения образовалось заполненное паром пространство. В лаборатории образец медленно нагревают и по моменту, когда содержимое пузырька вновь становится однородным, определяют температуру кристаллизации. Исследуя содержимое пузырька, устанавливают химический состав минералообразующего раствора.

Располагая необходимыми сведениями, минералог может помышлять и о теоретическом истолковании зависимости формы кристаллов от условий кристаллизации. Однако о законченной теории говорить еще рано. Главной задачей науки о природной кристаллизации остается накопление фактов — фундамента будущего учения. А пока что ученые стараются извлечь из уже накопленных фактов практические выводы.

Недавно в Советском Союзе и в Болгарии зарегистрировано первое научное открытие в этой области, имеющее непосредственное отношение к практическим задачам поисков

полезных ископаемых. Группа советских и болгарских минералогов (Д. П. Григорьев, Н. З. Евзикова, Б. Зидарова, И. Костов, С. К. Кузнецов, М. Малеев, Д. А. Минеев, В. А. Попов, Б. В. Чесноков, И. И. Шафрановский, Н. П. Юшкин) на основании многочисленных наблюдений установила, что в процессе образования минеральных индивидов происходит закономерная эволюция их формы, вызванная изменениями условий минералообразования. Эволюция идет как во времени, так и в пространстве. Замечено, что формы, согласующиеся с правилом Браве, преобладают в средние этапы кристаллизации и наиболее характерны для центральных частей рудных тел. Ученые нашли закономерности смены габитусов, позволяющие использовать морфологию кристаллов для поисков месторождений.

Но какова же «механика» воздействия внешних условий на облик растущего кристалла? Как, например, должен был бы изменяться кристалл в зависимости от пересыщения раствора? Разумеется, в природной обстановке габитус кристалла диктуется всей совокупностью обстрятьств кристаллизации, и обсуждать роль одного из них, взятого отдельно, можно лишь условно.

Пересыщение характеризует степень неравновесности системы кристалл — раствор. Чем дальше система от равновесия, тем сильнее она стремится его достигнуть, тем больше стимулируется высокий темп кристаллизации. Эта тенденция направлена на быструю отдачу энергии, энергетическую эффективность процесса. При больших пересыщениях включаются механизмы скорейшего роста: наращивание массы кристалла идет в первую очередь за счет тех граней, которые могут расти быстро. Когда пересыщение очень велико, быстро могут расти любые грани: зарождение слоев не служит препятствием, оно легко происходит на всей поверхности кристалла. Вследствие этого возможен относительно равномерный рост по разным направлениям: вероятно тенденция к изометрическому развитию. Лимитирующим фактором может оказаться скорость поступления вещества из раствора; это обстоятельство существенно, и мы к нему еще вернемся.

По мере истощения раствора трудности зарождения слоев растут. Возникает разница в скоростях роста различных граней, все более определяющая облик кристалла. Грани, на которых зарождение слоев происходит легче, обгоняют в росте другие грани, сокращаются в размерах или вовсе исчезают, вследствие чего первоначальный облик кристалла может измениться.

При дальнейшем снижении пересыщения зарождение новых слоев в конце концов становится маловероятным, и ведущая роль переходит к дислокационному механизму роста. На этот раз перемена в наибольшей степени касается кристал-

лов средних и низших сингоний. Оси винтовых дислокаций располагаются чаще всего вдоль цепей наиболее прочных химических связей, что в таких кристаллах нередко совпадает с направлением кристаллографической оси с или плоскости ав. В связи с этим возможно новое изменение облика — на длиннопризматический, игольчатый или, наоборот, таблитчатый.

А каково влияние температуры кристаллизации? Во-первых, от нее зависит растворимость, а следовательно, степень пересыщения при той же концентрации. Во-вторых, температура влияет на процессы адсорбции, и изменения, возникающие в адсорбционном слое, вызывают различия в питании отдельных граней.

Так при прочих равных условиях могли бы влиять на форму растущего кристалла пересыщение и температура раствора. Сложность, однако, состоит в том, что «прочих равных» условий в природе не бывает. Факторы кристаллизации тесно связаны между собой: изменение одного почти наверное означает изменение и других. Но об этом нам известно не очень много. Так что сказанное — не более чем узкая щелочка, сквозь которую можно взглянуть на неведомое лишь мельком и искоса; действительная картина много сложнее. К тому же совсем не обязательно, чтобы изменения все время шли в одном направлении: после остывания могло произойти новое повышение температуры, кристаллизатор мог получить новую порцию высококонцентрированного раствора. Минералогам предстоит немало потрудиться над поведением кристаллов, растущих в сложной природной обстановке.

А нам с вами интересно будет подумать над одним более общим вопросом. Мы видели, что кристалл, приспособляясь к условиям роста, довольно легко изменяет форму. Но ведь форма вносит определенный вклад в энергетику кристаллизации, в достижение равновесного состояния. Каким этот вклад? Оценив его, мы сможем судить о том, насколько форма, образно говоря, «небезразлична» растущему кристаллу.

Займемся ориентировочными расчетами. Энергетический выигрыш от кристаллизации складывается из энергии, освобождаемой за счет перехода вещества в кристаллическое состояние, за вычетом поверхностной энергии кристалла. Для простоты примем, что наш кристалл имеет форму куба и массу 1 моль. Переход такого количества вещества в кристаллическое состояние высвобождает энергию по крайней мере в десятки килоджоулей. Для большинства минералов 1 моль — это 50—250 г; возьмем большую из этих величин — 250 г. При плотности 2,5 г/см<sup>3</sup> (что близко к плотности большинства минералов) наш кристалл имеет объем 100 см<sup>3</sup>; длина его ребра  $\sqrt[3]{100}$  см, общая поверхность граней  $6(\sqrt[3]{100})^2$  — примерно 130 см<sup>2</sup>. Плотность поверхностной энер-

гии кристаллических тел обычно не превышает  $10^{-7}$  кДж/см<sup>2</sup>. Отсюда получаем, что вся поверхностная энергия нашего кристалла составляет не более  $1,3 \cdot 10^{-5}$  кДж, т. е. весьма малую долю общего энергетического итога процесса кристаллизации.

Как видим, вклад поверхностной энергии менее чем скромнен. Невозможно представить такие вариации формы кристалла, которые могли бы иметь существенное значение в валовом энергетическом балансе кристаллизации. С этой точки зрения кристаллу «почти безразлично», насколько его форма далека от равновесной.

Однако на отдельных этапах кристаллизации роль формы может оказаться более заметной. При низком пересыщении, когда система раствор — кристалл близка к равновесию, дальнейшее наращивание массы и энергетический эффект будут невелики. Изменение формы становится энергетически сопоставимым с кристаллизацией небольшой массы вещества. Поэтому при весьма низких пересыщениях стимулируется рост кристаллов, по форме близких к равновесным. Для получения равновесной формы в чистом виде необходимо, чтобы пересыщение было бесконечно малым, а рост — бесконечно медленным. А поскольку такие условия совершенно невозможно осуществить, строго равновесные формы реальных кристаллов практически не встречаются.

Как отмечалось, с ростом кристалла доля поверхностной энергии сокращается, так как поверхность растет медленнее, чем объем и масса. Но пока кристалл невелик, форма вносит более существенный вклад в энергетический баланс кристаллизации. Поэтому чем меньше кристалл, тем он совершеннее. Правда, это касается лишь совсем мелких кристалликов...

## Химические тонкости

В 1783 г. Ромэ-Делиль заметил, что добавка мочевины меняет форму кристаллов, выпадающих из раствора поваренной соли: вместо обычных кубов растут октаэдры. Открытие Ромэ-Делиля считается первым исследованием о влиянии химических примесей на форму кристаллов. Установлено, что это влияние столь значительно, что может полностью заслонить роль других условий кристаллизации. Этим не замедлили воспользоваться технологи: в наше время применение примесных добавок открыло большие возможности управления формой синтетических кристаллов. Велико значение примесей и в природной кристаллизации, практически всегда идущей в присутствии посторонних веществ.

Собственно говоря, кристаллизацией достигается как раз отделение постороннего вещества: из раствора выпадают чистые кристаллы, а примесь остается в растворенном виде.

Для этого ее должно быть не слишком много: концентрация примеси должна оставаться ниже уровня насыщения, тогда она не будет кристаллизоваться. Такой способ очистки с давних пор применяется в химической технологии и лабораторной практике.

Однако кристаллизацией можно отделить не всякое вещество. Ионы, близкие по размерам и химическим свойствам к ионам основного вещества, занимают часть их мест в структуре, и образуется кристалл смешанного состава — твердый раствор. Такая примесь называется изоморфной. Так, ионы  $Al^{3+}$  и  $Cr^{3+}$  близки по химическим свойствам и размерам ( $0,57 \cdot 10^{-8}$  и  $0,63 \cdot 10^{-8}$  см) и легко замещают друг друга в кристаллических структурах. Вследствие этого смесь алюминиевых и хромовых квасцов не разделяется кристаллизацией — из раствора выпадают кристаллы смешанного состава  $K(Al, Cr)(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ . Запятая между символами элементов означает, что в данном соединении они содержатся в переменном соотношении. Природные твердые растворы — оливины  $(Mg, Fe)[SiO_4]$ , вольфрамиты  $(Fe, Mn)[WO_4]$ , гранаты и др. Строго говоря, к твердым растворам относится большинство минералов — прямое следствие кристаллизации из сред смешанного состава. Не вызывая изменений в кристаллической структуре, изоморфная примесь практически не влияет на форму кристаллов.

Гораздо сильнее влияют на нее неизоморфные примеси. В кристалл они входят в качестве дефектов — посторонних атомов или включений. Появление дефектов вызывает усиление роста. А поскольку примесь поглощается избирательно — на одних гранях больше, на других меньше, — рост усиливается неодинаково. Вхождение примеси меняет шансы участников соревнования граней, что равносильно изменению габитуса.

Примесь способна повлиять на форму кристалла и не проникая внутрь него, а лишь адсорбируясь на поверхности. Адсорбированное вещество «экранирует» грань — препятствует осаждению частиц и тем самым тормозит рост. Неодинаковая адсорбция приводит к изменению габитуса. Подобным же образом может действовать и растворитель («гидратирование» граней), который тоже можно рассматривать как своего рода примесь.

В других случаях примесь способствует кристаллизации, разрушая «экран», образованный другой примесью. Грани при этом становятся более гладкими, скорость кристаллизации увеличивается. На практике это явление используется для повышения производительности оборудования по выращиванию искусственных кристаллов (так, добавки соединений лития увеличивают скорость роста синтетических кристаллов кварца).

Поскольку адсорбция зависит от температуры, одна и та же

примесь при разных температурах может влиять на облик кристалла по-разному.

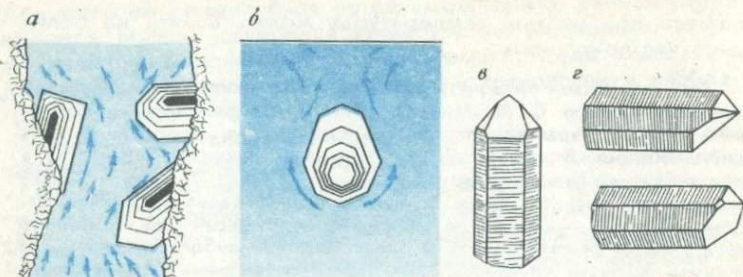
Примесь может затронуть роль структуры в ограничении кристалла. Советские ученые В. И. Михеев и И. И. Шафрановский вскрыли динамический характер поведения структур в активных средах кристаллизации. В соответствии с правилом Браве, галит растет в виде кубов: наибольшую плотность имеют грани  $\{100\}$ . Но так бывает только в нейтральной среде. Если же кристаллизация идет в присутствии активных — кислых и щелочных — примесей, то плотность сеток следует считать по ионам одного сорта — либо катионам, либо анионам. В таком случае самыми плотноупакованными оказываются сетки  $\{111\}$ , и в соответствии с правилом Браве габитус кристалла изменяется на октаэдрический.

## Про «кирпич» и «стрелу»

Мы выяснили, что форма кристалла определяется его структурой и вместе с тем зависит от состава, степени пересыщения, температуры раствора и других внешних факторов. Структура допускает целый набор форм; из них кристалл как бы подбирает наиболее подходящую для данных конкретных условий.

Кроме того, природные кристаллы подвержены искажениям формы. В сущности, это можно считать правилом, тогда как правильно ограниченные кристаллы составляют редкие исключения. Условимся под искажениями подразумевать неодинаковые размеры и контуры разных граней одной простой формы. Искажения большей частью понижают, обедняют симметрию реального кристалла. Вместо классического куба галита с формулой симметрии  $3L_4 4L_3 6L_2 9PC$  получается «кирпич» с симметрией  $3L_2 3PC$  — из 23 элементов симметрии потеряны 16, в том числе все главные оси. То, что осталось от куба, следовало бы отнести к ромбической сингонии. Но мы называем это «искаженным кубом» — и поступаем правильно. Галит — минерал кубической сингонии, такова его истинная симметрия, установленная по структурным данным. Рентгенограмма нашего «кирпича» со всей несомненностью подтвердила бы наличие у него элементарной ячейки с тремя равными ребрами и тремя прямыми углами — и этого достаточно, чтобы считать кристалл полноправным представителем кубической сингонии. Не является наш «кирпичик» отступлением от куба и с точки зрения основного закона кристаллографии: углы остаются прежними, прямыми.

Очевидно, неравномерное развитие кристалла связано с тем, что одноименные грани растут с разными скоростями. Виновата неравномерность массопереноса: к одинаковым граням неодинаково подается строительный материал. Там, где истощенный раствор быстрее заменяется свежим, грани при прочих равных условиях нарастают быстрее. Направленной



**Рис. 19.** Влияние несимметрии питания на форму кристаллов: а — рост в движущемся растворе (плоскость симметрии потока параллельна чертежу); б — концентрационные потоки; кристаллы кварца, росшие в вертикальном (в) и горизонтальном (г) положениях

движение раствора вызовет преимущественное отложение вещества на гранях, обращенных навстречу потоку (рис. 19, а); при росте кристалла в сланцеватой породе он будет больше всего удлиняться вдоль сланцеватости, так как в этом направлении проницаемость породы максимальна и раствор обновляется быстрее. Отчетливо оставляет свой след на облике кристалла сила тяжести, направленная всегда вертикально. Истощенный раствор, у которого плотность меньше, поднимается вверх, образуя так называемые концентрационные потоки (рис. 19, б), обуславливающие опережающий рост «подветренной», верхней стороны кристалла.

Подобные искажения кристаллов логично и удобно связать с симметрией массопереноса питания. Здесь мы впервые сталкиваемся с новой для нас симметрией физического явления — силового поля, потока вещества и т. п. Учение о симметрии физических явлений основано знаменитым французским физиком Пьером Кюри (1859—1906). В 1894 г. П. Кюри установил важнейший принцип: в физических явлениях симметрия причины отображается в симметрии следствия. В нашем случае форма кристалла (следствие) сохраняет элементы внешней симметрии, совместимые с симметрией массопереноса (причины), и утрачивает несовместимые элементы. Легко видеть, что действие принципа Кюри направлено на вычитание, исчезновение тех или иных элементов истинной симметрии кристалла.

Приложим принцип Кюри к нашим примерам. В первом случае (см. рис. 19, а) движущийся раствор имеет «симметрию стрелы» с единственным элементом — плоскостью симметрии Р. Согласно принципу Кюри, выросший в потоке кристалл должен сохранять элемент симметрии Р. Именно это мы и наблюдаем в действительности, хотя истинная симметрия кристалла может быть гораздо выше. Во втором

случае сланцеватая порода, пропитанная раствором, ограничивает массоперенос «симметрией цилиндра»  $L_{\infty\infty}PC$ . Однако формулы симметрии кристаллов со знаками бесконечности «запрещены». Максимум того, что дозволено, скажем, метакристаллу пирита, — это симметрия  $3L_23PC$ , которая вписывается в симметрию цилиндра. Таким образом, кристалл пирита деградирует до «кирпичика». Кристалл, сформировавшийся при участии концентрационных потоков, приспособился к симметрии  $L_{\infty\infty}P$  поля земного тяготения («симметрия конуса» — бесконечное множество плоскостей симметрии, пересекающихся по оси бесконечного порядка). Искажения будут зависеть от ориентировки кристалла. Кристалл кварца, растущий вертикально, получит видимую симметрию  $L_33P$ , растущий горизонтально или наклонно — симметрию  $P$  (рис. 19, в, г). И наоборот, по форме кристалла можно предсказать его положение во время роста.

Собственные элементы симметрии кристалла сохраняются лишь при условии, если они не противоречат симметрии массопереноса. Отсюда следует, что более всего подвержены искажениям высокосимметричные кристаллы. Их видимая симметрия часто опускается до уровня низших сингоний, и без того преобладающих среди кристаллов минералов (см. раздел «Хаос и порядок»). Собственная симметрия всегда сохраняется при массопереносе с симметрией шара  $\infty L_{\infty\infty}PC$ , т. е. при равномерном питании со всех сторон. Шар — тело с предельно возможной симметрией, в которую может вписаться любой из 32 видов симметрии кристаллов. Такую симметрию имеет самый распространенный в природе способ массопереноса — диффузия. Но чаще всего на нее накладываются искажения, вносимые силой тяжести и другими факторами массопереноса. Поэтому-то неискаженные кристаллы минералов так редки.

Несимметрия массопереноса, однако, совсем не затрагивает кристаллической структуры и не вызывает нарушений закона постоянства углов. «Наложенные» искажения симметрии следует отличать от истинной несимметричности, обусловленной самой природой кристаллического тела.

Не следует думать, что габитусные искажения — только лишь досадная помеха изучению кристаллов. Наоборот, они имеют огромное онтогенетическое значение. Зная, как причина связана со следствием, можно по следствию судить о причине. Искажения кристаллов — «подсказка» о том, как происходил массоперенос и как был расположен кристалл во время роста. Расшифровка габитусных искажений служит минералогу чрезвычайно ценным исследовательским инструментом. Симметрией кристаллообразования много занимались крупные советские ученые — академик А. В. Шубников, Г. Г. Леммлейн, И. И. Шафрановский, Г. Н. Вертушков и другие.

Принцип Кюри универсален — он распространяется на все тела и явления природы. «То, что растет или движется по вертикали, —

пишет И. И. Шафрановский, — имеет радиально-лучевую симметрию (симметрию ромашки); то, что растет или движется горизонтально или наклонно относительно земной поверхности, характеризуется симметрией листка». Ромашка и все другие цветы, обращенные кверху, деревья, морские лилии и звезды, как и вертикально растущий кристалл кварца, имеют внешнюю симметрию  $L_n P$ . Гладиолус, львиный зев и все другие цветы, сидящие на стебле сбоку; передвигающиеся по горизонтали существа — насекомые, рыбы, люди, звери — имеют симметрию листка (или стрелы)  $P$ , как и наклонно растущий кристалл кварца. Во всех этих случаях проявляется действие одного и того же физического фактора — поля земного тяготения с симметрией конуса. Наша планета служит общим домом и для минералов, и для населяющих ее организмов, и неудивительно, что в формах живой и «косной» природы закономерны общие черты.

## Косметика кристалла

Природный кристаллизатор — это еще и косметический кабинет. Пока кристалл растет, он украшается разнообразными узорами, которые меняются в зависимости от условий кристаллизации. При высоких пересыщениях, когда рост идет с одновременным зарождением многих слоев, они разрастаются вдоль грани вдгонку друг другу, образуя террасообразный узор — ступени роста высотой до сотен и тысяч атомных слоев, различимые под микроскопом, а иногда и невооруженным глазом.

Соревнование граней различных простых форм сопровождается комбинационной штриховкой, состоящей из узких полосок граней смежных форм. Комбинационная штриховка всегда параллельна разделяющему грани ребру. К этому типу скульптуры относится уже знакомая нам штриховка на кристаллах сфалерита (см. рис. 10, а).

К «фигурам роста» относятся также вицинали — скульптуры в виде пологих бугорков, специфичных для данного минерала и для данной простой формы. Мы их видели на кристалле вилуита (см. рис. 11, а); можно разглядеть вицинали и на большинстве других кристаллов. Возникают они из-за локального усиления роста, вследствие появления какой-нибудь неоднородности — дефекта, захваченного кристаллом включения, вокруг которых облегчается зарождение новых слоев. Источниками новых зарождений могут стать также механические повреждения — царапины и трещины. С ними растущий кристалл справляется сам: вокруг повреждения начинается усиленный рост (вследствие появления неровности на гладкой грани) и образуется нарост-рубец, в точности такой, как при заживлении раны. Трудно придумать им более точное название, чем то, которое дал изучавший их Г. Г. Леммлейн: «шрамовые вицинали».

## КРИСТАЛЛЫ ИСЧЕЗАЮТ

Кристаллы, как известно, могут не только появляться на свет и расти, но и исчезать — растворяться, расплавляться и даже испаряться. Как и рост, исчезновение кристалла — процесс постепенный. Он начинается сразу же, как только раствор, окружающий кристалл, по какой-либо причине становится недосыщенным, нагревается или обогащается химически активными реагентами. В природе встречаются впечатляющие примеры растворения минералов. В известняках подземные воды вымывают большие полости — пещеры, размеры которых иногда исчисляются километрами. Растворителем карбоната кальция, слагающего известняки, служит вода, насыщенная углекислотой; за счет этого растворимость карбоната с ничтожной величины 0,013 г/л повышается в десятки раз. Когда такой раствор попадает в условия, где избыток углекислоты может улетучиться, растворимость карбоната кальция вновь падает, и начинается кристаллизация — образование сталактитов, сталагмитов и бесчисленных других построек из кальцита и арагонита, составляющих неповторимое очарование пещер.

К числу довольно хорошо растворимых минералов принадлежит гипс. С повышением температуры его растворимость растет только до 24°C, затем вновь падает; кроме того, она увеличивается в присутствии хлорида натрия. Эти особенности обуславливают интенсивную кристаллизацию гипса с обилием форм роста и растворения в местностях с засушливым климатом, большими суточными перепадами температуры и засоленными почвами.

Как только раствор вновь становится пересыщенным, начавший растворяться кристалл опять начинает расти — регенерировать. История минерального индивида нередко складывается из многократных этапов роста, растворения и регенерации.

Растворимость кристаллических индивидов заметно увеличивается из-за структурных дефектов и примесей. Зависит она и от размеров индивидов: мелкие зерна растворяются лучше крупных кристаллов. За счет этой разницы минералы в благоприятных условиях могут перекристаллизовываться с укрупнением индивидов.

В природной обстановке кристаллы нередко подвергаются частичному растворению. При этом на поверхности кристалла остаются соответствующие следы, если же растворение зашло достаточно далеко, меняется и его внешняя форма. Так, характерный облик кристаллов кварца, топаза, берилла из некоторых гранитных пегматитов (рис. 20) — не что иное как результат из частичного растворения активными водными растворами. Для минералога растворение — это не просто разрушение. Изучая оставленные растворением следы, он



Рис. 20. Кристалл берилла, подвергшийся частичному растворению. Украина

воссоздает один из этапов истории кристалла, а значит, и окружавшей его обстановки.

Растворение можно рассматривать как явление, обратное росту. Если рост кристалла сопровождается появлением бугорков-вициналей, то при растворении (разъедании) возникают ямки — фигуры травления. Их форма и симметрия зависят от кристаллической структуры. Различные грани поддаются растворению в разной степени, и кристалл постепенно покрывается быстро растворяющимися гранями (тогда как при росте преобладают медленно растущие грани) — образуется форма растворения. В первую очередь растворению подвергаются вершины и ребра, вследствие чего формы растворения часто округлы и кривогранны.

Несимметрия массопереноса растворения, т. е. поступления растворителя и удаления обогащенного раствора, вызывает искажения формы кристалла. В движущейся среде, наибольшему растворению подвержена та сторона кристалла, которая встречает поток. Как и при росте, кристалл может деградировать до симметрии  $P$ , только в данном случае это происходит не за счет выклинивания граней, встречающих поток, а наоборот, в результате их увеличения. В неподвижной сре-

де сказывается влияние концентрационных потоков. Они имеют нисходящее направление, так как при растворении плотность раствора увеличивается. Вертикально расположенный кристалл стремится к симметрии  $L_{\infty}P$ , а наклонный или горизонтальный — к симметрии  $P$ . Во всех этих случаях, как и при любом взаимодействии кристалла со средой, неизменно действует универсальный принцип Кюри.

## ПАРАД ИНДИВИДОВ

Устроим перерыв: отдохнем от теории и отправимся в минералогический музей. Посмотрим еще раз на знакомые минералы: может быть, теперь они предстанут нашему взгляду в несколько ином свете. Осматривая экспонаты, полезно припомнить, не попадалось ли что-нибудь похожее где-либо еще — хотя бы в вашей собственной коллекции минералов.

## Прогулка по залам музея

В музее экспонаты размещены в строгом порядке, по полочкам минералогической систематики. Мы с вами осмотрим одну витрину за другой, а возле самых интересных экспонатов задержимся, вникнем, поразмышляем.

Стрелка «Начало осмотра» приглашает к витрине с надписью «Простые вещества» — самородные металлы и неметаллы. Медь, серебро, золото; железо, столь же редкое в самородном виде, сколь обычное в повседневной жизни; минералогический уникум — жидкий минерал ртуть; платина и ее родня — палладий, иридий, осмий... Заметно преобладает кубическая сингония: закон Федорова — Грота отводит этим простейшим по составу минералам верхние ступени иерархической лестницы симметрии. Четко выраженные кристаллы, впрочем, редки: самородные металлы большей частью вынуждены приспосабливаться к тесным пустотам вмещающей породы, а в россыпях, лишившись защитной оболочки, из-за своей ковкости и мягкости быстро теряют форму. Здесь кое-что непонятно: не похожие на кристаллы веточки, ниточки и ремешки, в природное происхождение которых можно поверить, лишь уповая на авторитет музея. На эти образцы стоит обратить внимание.

С самородными неметаллами положение иное: высшую симметрию имеет только алмаз — самородный углерод. Для остальных потолок — средняя категория. Причина — в направленности химических ковалентных связей, определяющей структуры самородных неметаллов. В кристалле алмаза четыре такие связи атома углерода расположены в пространстве совершенно симметрично, чем и обусловлена кубическая сингония алмаза. В других самородных неметал-

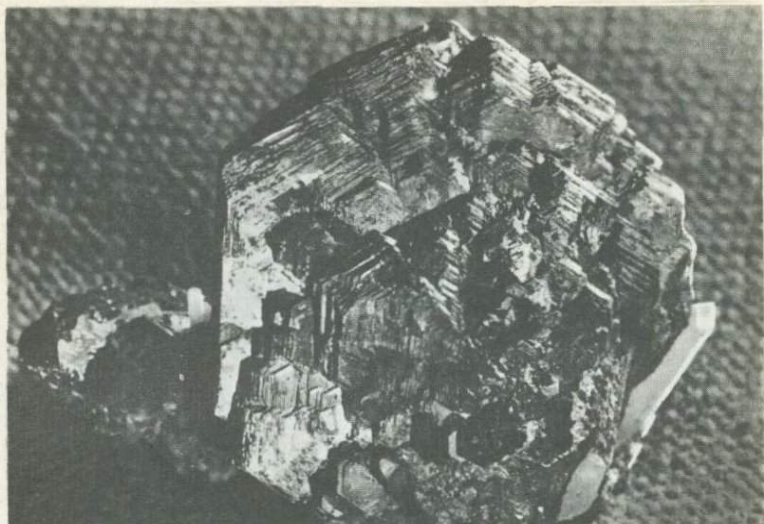


Рис. 21. Кристалл пирротина. Сихотэ-Алинь

лах связи не столь симметричны и, как следствие, — понижена внешняя симметрия кристаллов.

Кристаллы алмаза очень интересны, но мало доступны даже для музеев. В свои молодые годы А. Е. Ферсман вместе с В. Гольдшмидтом специально изучал кристаллографию алмаза и составил его подробные описания. Характерная особенность многих природных кристаллов алмаза — выпуклые грани и ребра. Полагают, что это результат частичного растворения алмаза в магматическом расплаве, из которого он кристаллизовался.

В разделе «Сульфиды» задержимся возле кристалла пирротина (рис. 21). Этот минерал представляет собой одно из соединений железа с серой. Он довольно распространен в природе и встречается в разнообразной геологической обстановке. Но кристаллы пирротина попадаются редко и ценятся как коллекционные экспонаты. Главная примета пирротина — способность притягиваться магнитом, за что он был назван А. Г. Вернером «магнитным колчеданом». Позже он получил современное название, связанное с красноватым оттенком бронзово-желтой окраски. Сочетание этой окраски, характерного «колчеданного» металлического блеска и редкого для минералов свойства — магнитности — составляет неповторимый признак, позволяющий легко узнать пирротин и безошибочно отличить его от других минералов.

Пирротин относится к гексагональной сингонии, чем определяется характерный габитус кристаллов. На нашем образце



Рис. 22. Кристаллы антимонита. Кадамджайское месторождение, Киргизия

заметны фигуры роста — небольшие ступеньки, составленные участками граней гексагональной дипирамиды и пинакоида. Известна и моноклинная разновидность пирротина. По всем правилам следовало бы считать ее отдельным минеральным видом, но дело осложняется тем, что обе модификации образуют тесные, неразделимые сростания — структура кристалла строится из крошечных гексагональных и моноклинных участков. В пространственной решетке пирротина половина узлов принадлежит атомам серы, половина — атомам железа, но последнего всегда не хватает — до 20% соответствующих позиций в структуре остаются вакантными. От «дефицита» железа зависят некоторые свойства пирротина: плотность, магнитность, тонкие оттенки цвета.

Интересны и образцы антимонита (рис. 22). Он имеет цепочечную кристаллическую структуру с прочными связями внутри цепочек и сравнительно слабыми — между цепочками. Такая структура обуславливает вытянутый, призматический габитус кристаллов антимонита и совершенную спайность по одному из продольных направлений, по которому структурные цепочки легко отделяются друг от друга. Продольная комбинационная штриховка образована пересечениями граней призмы  $\{110\}$  и пинакоида  $\{010\}$ . В нашей стране прекрасными образцами этого минерала славится Кадамджайское месторождение в Киргизии.



Рис. 23. Гематит. Коршуновское месторождение, Иркутская обл.

Перейдем к витрине оксидов. Нельзя равнодушно пройти мимо изящных кристаллов кварца — минерала чрезвычайно многоликого, интересного во многих отношениях, сыгравшего заметную роль в истории науки. Г. Г. Леммлейн, блестящий исследователь и знаток, посвятивший много сил изучению кварца, назвал его «элегантным» минералом, отдавая дань, видимо, не только внешности, но и удивительному сочетанию свойств. С кварцем мы уже хорошо знакомы и не раз еще встретимся в дальнейшем. А сейчас перейдем к двум совсем обычным и распространенным оксидам железа — гематиту и магнетиту. Оба они — чрезвычайно важные рудные минералы. Гематит заслуживает упоминания и как один из самых красивых минералов, сочетающий богатство и разнообразие формы с приятной окраской и сильным блеском. Хорошие коллекционные образцы гематита нечасты даже на месторождениях, где он добывается в больших количествах как железная руда. На рис. 23 представлен один из морфологических «капризов» гематита — кристалл, покрытый красивыми фигурами роста.

Магнетит, напротив, отличается кристаллографической ясностью и строгостью и не столь разнообразен по природным выделениям: распространены всего две простые формы — октаэдр  $\{111\}$  и ромбододекаэдр  $\{110\}$ , другие встречаются редко. Комбинация форм  $\{111\}$  и  $\{110\}$  показана на рис. 24. Комбинационная штриховка на гранях ромбододекаэдр-

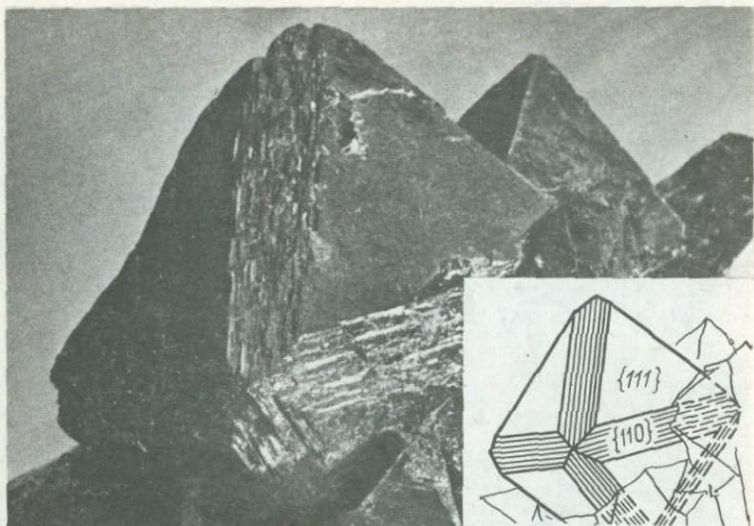


Рис. 24. Магнетит. Дашкесан, Азербайджан

ра очень характерна для магнетита. Она всегда направлена вдоль длинной диагонали ромба, т. е. вдоль смежной грани октаэдра — как правило, гладкой. Какая из этих двух форм «моложе»? Очевидно, октаэдр, иначе штриховка была бы на его гранях. Как и гематит, магнетит встречается преимущественно в сплошных массах, но на некоторых месторождениях попадаются хорошие кристаллы и друзы. Иногда магнетит образуется за счет частичного восстановления гематита и при этом наследует его внешнюю форму. В честь известного русского геолога И. В. Мушкетова (1850—1902) такие псевдоморфозы названы мушкетовитами.

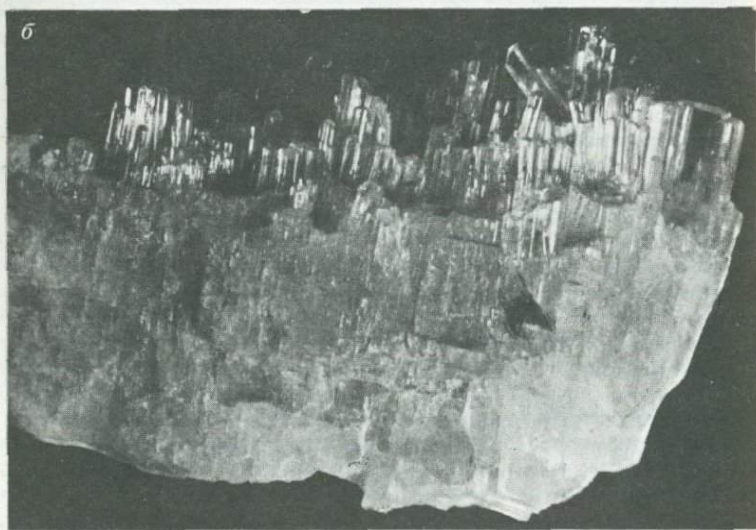
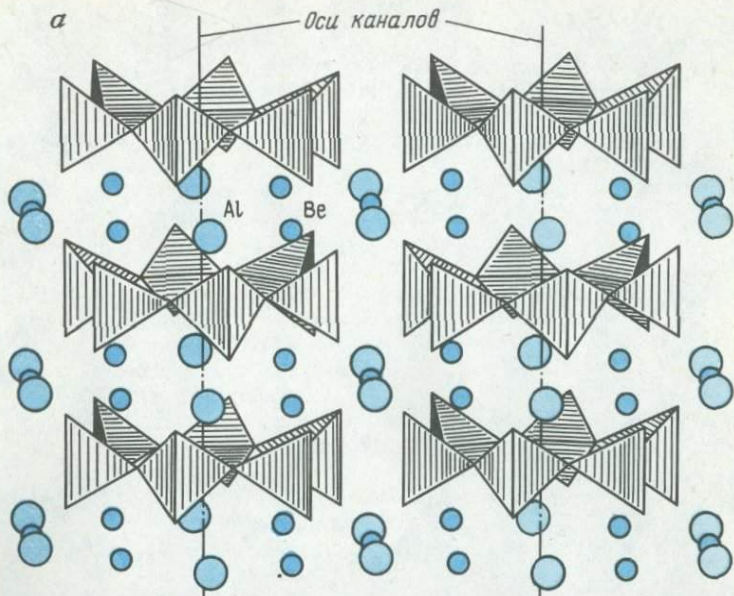
Среди фосфатов, несомненно, привлекут внимание образцы апатита. Вот два совсем не похожих друг на друга кристалла (рис. 25) — недаром А. Г. Вернер назвал этот минерал «обманщиком» («апатао» — по-гречески «обманываю»). В ограничении первого кристалла главенствует гексагональная призма, присутствует также дипирамида (на данном кристалле только одна ее половина). Некоторая несимметричность головки позволяет представить положение кристалла во время роста. Таблитчатый габитус другого кристалла в основном определяется пинакоидом, на котором отчетливо заметны ступени роста, а по краю расположены небольшие грани призмы и дипирамиды. Кристаллы апатита таблитчатого габитуса характерны для гидротермально минерализованных трещин «альпийского» типа.



Рис. 25. Кристаллы апатита. Слюдянка, Иркутская область (справа); Приполярный Урал (слева)

Раздел силикатов в музее наиболее обширен — в природе на долю этого класса приходится четверть известных минеральных видов. Остановимся около берилла  $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$  — минерала весьма популярного у собирателей. Прозрачные зеленоватые, желтоватые, голубоватые бериллы — прекрасные самоцветные камни; особенно ценятся ярко окрашенные разновидности берилла: изумруд (один из самых дорогих камней), аквамарин, воробьевит, гелиодор.

Не менее интересен берилл и в морфологическом отношении. В его кристаллической структуре кремнекислородные тетраэдры (см. рис. 18, а) соединены по 6 штук в кольца  $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ , а кольца, в свою очередь, собраны в параллельные друг другу стопки, или колонки (рис. 26, а). Крепежными деталями, или, точнее, цементом, служат катионы  $\text{Be}^{2+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ . Вдоль боковых сторон колонок располагаются грани гексагональной призмы  $\{10\bar{1}0\}$  кристалла берилла; грани пинакоида  $\{0001\}$  ориентируются вдоль торцов колонок. Берилл — на редкость выразительный пример соответствия структуры и внешней кристаллической формы. Внутри структурных колонок имеются полые каналы, доступные для молекул воды и других растворяющих агентов. Поэтому берилл



**Рис. 26. Берилл:**  
 а — кристаллическая структура; б — регенерация поперечного излома кристалла



**Рис. 27.** Кристалл кальцита с «присыпкой» кристалликов пирита. Восточное Забайкалье

может растворяться не только снаружи, но и изнутри. Каналы растравливаются до тонких капилляров, придающих кристаллу шелковистый блеск.

На нашем образце (рис. 26, б) видно, как регенерировал кристалл берилла, разбитый поперечной трещиной, — он обладает спайностью по пинакоиду, выраженной, правда, довольно слабо. Неровности излома послужили местами роста, поэтому регенерация шла сразу во многих точках, и получилась чаша параллельно ориентированных призматических кристалликов («многоголовый рост»). Надо полагать, что если бы процесс регенерации продолжался, кристаллики в конце концов срослись бы друг с другом. Возможно, некоторые участки оказались бы при этом отрезанными от питающего раствора, и тогда в «залеченном» кристалле остались бы включения-пузырьки.

Коллекция карбонатов привлекает яркими красками: малахит, азурит, родохрозит, смитсонит... Но по разнообразию кристаллической формы самое видное место занимает довольно скромно окрашенный кальцит. К витрине с кальцитами можно возвращаться снова и снова, каждый раз делая для

себя новое открытие. Взгляните хотя бы на это сооружение (рис. 27). Это один кристалл, хотя он больше похож на сросток, так как изобилует «не положенными» кристаллу входящими, т. е. направленными внутрь кристалла углами. Столь странная метаморфоза постигла кристалл при смене габитусной формы. Сначала он рос скаленоэдром, имея наибольшее удлинение вдоль главной оси. Затем во внешних условиях что-то переменялось, и форма роста сменилась на упрощенный ромбоэдр с наибольшим развитием в плоскости (0001), перпендикулярной главной оси. Но переход на один ромбоэдр потребовал бы слишком много времени, и смена габитуса происходила сразу множеством ромбоэдров на всей поверхности кристалла. Возникла комбинационная штриховка, которая постепенно огрублялась и переходила в ребристую форму — начался многоголовый рост. При дальнейшем росте входящие углы в конце концов заросли бы и получился бы один ромбоэдр. Как морфологический тип этот пример аналогичен предыдущему, хотя причина многоголового роста иная.

На этом мы прервем нашу экскурсию. Как видим, в музей можно прийти не только для того, чтобы выразить восхищение талантом и вкусом природы. В музее мы задаем природе наши вопросы и испытываем первые радости от того, что начинаем понимать ее ответы. Но на этот раз еще не все ответы были нам понятны. Тем интереснее: есть повод задуматься и поискать объяснение. Непонятное может оказаться новым. Вот и сейчас мы заметили что-то новое — об этом и пойдет речь.

## «Диковинные игрушки природы»

Когда-то М. В. Ломоносов назвал так необычных представителей минерального царства, не укладывавшихся в общепринятые представления о минералах. Во времена великого ученого натуралиста и любознательная публика по этому поводу любили употреблять слово «монстрозитеты», и при всей старомодности этого эпитета ему и сегодня не откажешь в меткости.

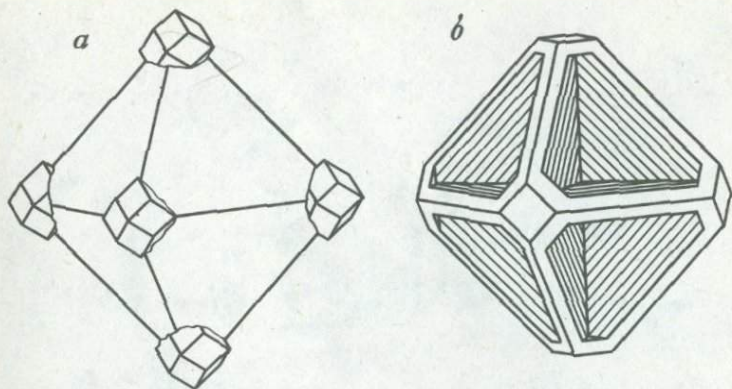
Один из таких «монстров» мы только что разглядывали, поначалу тоже находя его странным, что, впрочем, не помешало нам оценить его изящество. Обилие ребер и входящих углов роднит его со скелетными кристаллами. Такие кристаллы растут преимущественно ребрами и вершинами, посягая этим на святая святых — принцип самоограничения. Вид скелетных кристаллов совершенно необычен: вместо плоских граней — торчащие во все стороны острия и ступенчатые ребра (рис. 28).

Скелетные кристаллы противоречат нашим привычным представлениям прежде всего тем, что обладают непомерно развитой поверхностью. С энергетической точки зрения это кажется неоправданным. Может быть, скелетные кристаллы — и в самом деле просто «игрушки», случайные курьезы природы? Но для этого они слишком часты и появляются с определенной, выраженной закономерностью. Видимо, имеются веские причины, вынуждающие кристаллы отказываться от экономной компактной формы.

Мы уже выяснили, что при высоком пересыщении вариации формы кристалла несущественны для энергетики кристаллизации. Из этого следует, что быстрое наращивание массы кристалла, если потребуется, будет происходить и ценой искажений формы. Но потребуется ли? И ценой каких именно искажений?

При больших пересыщениях, когда рост может осуществляться по зародышевому механизму Косселя — Странского, на ионных кристаллах возникновение двумерного зародыша вероятнее вблизи ребер и вершин, чем в середине грани. Уже это создает естественную предпосылку скелетного роста: при послешной кристаллизации новые слои могут возникать вблизи ребер и вершин раньше, чем разрастутся предыдущие слои. Но главная причина скелетного роста находится за рамками модели Косселя. Приглядевшись, мы должны будем признать, что, будучи предоставлен самому себе, кристалл питается неудовлетворительно. Если ребра и вершины окружены питающим раствором со всех сторон, то о середине граней этого сказать нельзя. Поэтому раствор здесь истощается быстрее, чем у вершин и ребер, и равномерный рост возможен лишь при условии, что раствор перемешивается и концентрация быстро выравнивается. В противном случае грани начинают «голодать» и вследствие этого отставать в росте от вершин и ребер. Такая ситуация возникает опять-таки при высоком пересыщении, неподвижном растворе и затрудненной диффузии: раствор не в состоянии обеспечить равномерную поставку вещества кристаллу. Удивительно чутко реагирует кристалл на окружающую обстановку! Лишь только возникнут трудности с массопереносом питания — и он сам начинает тянуться навстречу питающему веществу, что немедленно отражается на его внешнем облике.

Итак, в определенных обстоятельствах скелетная форма обеспечивает кристаллу более быстрое наращивание массы, а значит, она при этом не только возможна, но и предпочтительна. Определенные обстоятельства состоят в том, что кристаллизация лимитируется массопереносом. Появление скелетных форм закономерно во всех случаях, когда питающее вещество поступает медленнее, чем может расти кристалл: в средах с повышенной вязкостью, затрудняющей диффузию; при низкой теплопроводности кристалла и среды;



**Рис. 28. Скелетные кристаллы:**

а — октаэдр флюорита с вершинами в форме ромбододекаэдров;  
 б — «реберник» пирита

при адсорбции «отравляющих» примесей преимущественно серединами граней; в обычных условиях — когда затруднено питание какой-либо части кристалла. Так, кристалл, лежащий на дне полости, вырастает снизу «реберником», так как нижние ребра питаются нормально, а нижняя грань — недостаточно.

В соляных озерах иногда образуются эффектные реберники — «лодочки» галита. Кристалл зарождается на самой поверхности рассола и потому питается только снизу и с боков, а сверху остается сухим. По мере роста он тяжелеет и опускается, но так как верхняя грань не наращивается, получается квадратная воронка. Сам по себе скелетный рост в данном случае вполне естествен, все дело, очевидно, в том, что кристалл зарождается на поверхности озера. Как это происходит? Под лучами солнца поверхностный слой рассола нагревается и испаряется. Нагревание ведет к расширению жидкости и уменьшению ее плотности, выпаривание — наоборот, к увеличению. Но в отличие от других веществ растворимость галита мало меняется с температурой. Поэтому испарение приводит к пересыщению раствора и выпадению избытка галита раньше, чем поверхностный слой станет достаточно тяжелым и опустится вниз.

К вынужденным формам роста принадлежат также кристаллические дендриты — как бы гипертрофированные, разросшиеся скелетные кристаллы (рис. 29). Еще в самом начале экскурсии в музей мы познакомились с дендритными формами, очень характерными для самородных металлов — золота, серебра, меди. Иногда дендриты представляют своеобразные агрегаты минералов. Причины их возникновения —



**Рис. 29. Кристаллические дендриты:**

слева — самородная медь (Джезказган); справа — нашатырь (Таджикистан)

в общем те же, что и скелетов: затрудненное питание, плохой отвод тепла. Нередко дендриты находят в узких трещинах вмещающей породы. Каждая ветвь стремилась расти в сторону более крепкого раствора, подальше от конкурирующей соседней ветви, и под влиянием этой тенденции дендрит все более разрастался в стороны. Такой способ роста определяет форму дендритов, сходную с кустами и деревьями. Отсюда и название: «дендрон» — по-гречески дерево.

Давно замечено, что образование дендритов происходит, как правило, в сильно пересыщенных растворах и значительно переохлажденных расплавах. Существенную роль играют тормозящие рост примеси: при одних и тех же условиях в загрязненных средах развиваются дендриты, а в чистых — обычные кристаллы. Почему это происходит, показал в 1950 г. советский исследователь Д. Д. Саратовкин. Растущий кристалл извлекает из раствора или расплава чистое вещество, а примесь накапливается вокруг и начинает тормозить рост граней. Однако вблизи вершин и ребер она как бы оттесняется смежными гранями и остаются просветы, обеспечивающие преимущественный рост вершин и ребер. На изломе

контура образовавшегося отростка возникает ответвление, на нем со временем вырастает ветвь второго поколения, и т. д.

Дендритный рост часто рассматривают как следующую фазу скелетного роста. Тот и другой происходят в условиях высокого пересыщения, присутствия примесей, способствующих накоплению дефектов. Как будет ясно из дальнейшего, это может привести к отклонениям от закона постоянства углов. В частности, по этой причине ветви дендрита по мере роста нередко утрачивают единую кристаллографическую ориентировку.

Гораздо реже встречаются в природе антискелеты — кристаллы с выпуклыми гранями, нараставшими быстрее ребер и вершин. Антискелетные формы изучены еще недостаточно. Объективная предпосылка их возникновения — меньшая по сравнению со скелетами неравновесность: при той же массе антискелет обладает меньшей поверхностью. Развитию антискелетов может способствовать преимущественная адсорбция тормозящих примесей ребрами и вершинами. По-видимому, появление антискелетов более вероятно при малых пересыщениях.

К минералогическим «монстрозитетам» следует отнести также нитевидные кристаллы — тонкие волокноподобные индивидуы, вытянутые, как правило, вдоль одной из кристаллографических осей. К ним принадлежит «проволочное» серебро, тонкие иголки джемсонита, малахита, турмалина, «лучистых» цеолитов, волокна амфиболов (рис. 30) и др. Широко известны агрегаты нитевидных кристаллов: асбесты (хризотилковый и амфиболовые), «горная кожа», «горная пробка» (амфиболы, палыгорскит, сепиолит) и др. Кристаллы кварца, кальцита, флюорита, содержащие включения нитевидных кристаллов рутила, турмалина, козалинта, антимонита и других минералов, называются «волосатиками».

Самые тонкие нитевидные кристаллы («усы», «вискеры») обладают совершенной кристаллической структурой и вследствие этого — необычайно высокой механической прочностью и химической стойкостью. Эти свойства привлекли внимание к нитевидным кристаллам. В настоящее время ведутся работы по их выращиванию.

Своеобразие нитевидных кристаллов в большинстве случаев невозможно объяснить несимметрией массопереноса. К тому же они часто сопутствуют обычным индивидуам тех же минералов. Очевидно, нитевидные кристаллы возникают благодаря каким-то особым механизмам роста.

Минералы нитевидной формы чаще всего (хотя и не обязательно) имеют кристаллическую структуру цепочечного типа. Они встречаются в разных месторождениях, но более всего характерны для зон выветривания и окисления, газобразных выделений вулканов (фумарол), низкотемпературных гидротермальных жил. Здесь нередко соседствуют друг



Рис. 30. Биссолит — нитевидный актинолит. Дашкесан, Азербайджан

с другом «усы» различных минералов. Как правило, боковые поверхности этих кристаллов весьма совершенны. Это говорит о том, что в образовании боковых граней не принимал участия дислокационный механизм роста.

Исследователь природных нитевидных кристаллов болгарский минералог М. Малеев объясняет их возникновение совместным, взаимоусиливающим действием нескольких факторов, каждый из которых создает тенденцию к вытянутому габитусу. Из-за особенностей структуры, наличия винтовой дислокации или по другой причине кристалл уже на ранней стадии роста получает преимущественное развитие в каком-нибудь одном направлении. При достаточно высоком пересыщении он развивается более или менее обычным путем. Если пересыщение мало, рост идет медленно, и формируется совершенная структура с малым числом дислокаций, располагающихся главным образом вдоль удлинения кристалла. Когда пересыщение недостаточно для зарождения новых слоев, рост боковых граней прекращается, но торец кристалла продолжает расти, так как здесь имеются выходы осей винтовых дислокаций. Тенденция к нитевидному росту усиливается избирательным поглощением примесей боковыми гранями.

Нитевидные кристаллы нередко вырастают на пористых подложках. Известняки, глины, некоторые другие горные породы пронизаны мелкими порами, по которым могут капил-

лярными силами подниматься минералообразующие растворы. В устьях капилляров раствор испаряется, и возникают центры кристаллизации; рост идет со стороны основания кристалла, куда поступает свежий питающий раствор. В данном случае нитевидная форма обусловлена малыми размерами пор и односторонним питанием растущих кристаллов. Развивая значительное усилие, кристаллы преодолевают сопротивление собственного веса и даже поднимают обломки породы. Когда агрегат нитевидных кристаллов становится слишком тяжелым, рост прекращается. Так образуются агрегаты некоторых хорошо растворимых минералов.

## РЕЗЮМЕ О МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДИВИДАХ

Минералы рассказали нам о своих морфологических контрастах, о диалектике кристаллизации, условиях, влияющих на внешний облик природных кристаллов. Рассказали пока совсем немного, но достаточно, чтобы сделать некоторые обобщения.

Форма реального кристалла определяется внутренним фактором — кристаллической структурой — и внешним — взаимодействием со средой обитания. Внутренний фактор точно обозначает границы, в которых каждый минерал может «выбрать» форму кристаллических индивидов. Конкретный же выбор диктуется внешним фактором, более точно — изначальным стремлением системы среда — кристалл к скорейшему установлению равновесия. Отсюда — диалектический, противоречивый характер развития кристалла: достигнутое равновесие предполагает максимально компактную форму, а для этого необходим медленный рост; но чтобы достигнуть равновесия скорейшим образом, т. е. для быстрого роста, нужна развитая поверхность, а значит, *неравновесная форма*. Противоречие всякий раз разрешается в зависимости от конкретных обстоятельств: наличия свободного пространства и расположения в нем растущего кристалла; состояния среды — температуры, давления, концентрации кристаллизующегося вещества и примесей; динамики среды — ее движения, темпа обновления, интенсивности и симметрии массопереноса. Ко всему этому форма кристалла весьма чувствительна. Кристаллическая структура, напротив, сохраняется даже при широких изменениях условий кристаллизации. При всех обстоятельствах, пока возможно существование данного минерала, внутренний фактор не позволяет вариациям внешнего облика кристалла выйти за строго определенные границы.

В связи с этим внутренний фактор — кристаллическую структуру — можно было бы назвать фактором стабильности, консервативности кристалла, а внешний — влияние среды —

фактором его изменчивости. Сама же форма выступает как отражение внутренней сущности кристалла и одновременно — как средство его приспособления к среде.

Совершенные кристаллы — редкие, избранные творения природы, в буквальном смысле плоды ее долгой тщательной работы. Абсолютное же совершенство, идеальная симметрия, по-видимому, принципиально чужды природным кристаллам. Динамика развития, скорость процесса, в конечном счете — те или иные проявления фактора времени, — вот что нарушает идеальную симметрию. Еще в 30-годы В. И. Вернадский указал, что в таких нарушениях повинны несимметричность, необратимость времени, в стороне от которых не могут остаться ни одна вещь, ни одно явление. Подвластны этому могущественному воздействию и кристаллы.

А теперь представим на минуту, что все было бы наоборот: кристалл всегда вырастал бы в самой совершенной — равновесной — форме. Идеальной, но единственной! Вместе с несовершенствами реальных кристаллов исчезло бы и их удивительное разнообразие, исчезла бы богатейшая гамма их свойств, без использования которых жизнь цивилизованного общества уже немыслима.

Минералогу, как биографу реального природного кристалла, он интересен более всего своими отклонениями от нормы. В них и индивидуальность кристалла, и его память о «жизненных обстоятельствах». Драматические перипетии биографии реального кристалла позволяют нам иначе увидеть его «несовершенства» и с эстетической точки зрения.

# РОДСТВЕННИКИ, СЕМЬИ, БЛИЗНЕЦЫ



В системе «индивиды — агрегаты» есть неподделенная область. Занимают ее минеральные образования, сочетающие признаки и индивидов, и агрегатов. Возникают они не по воле случая, как агрегаты и сростки, а обязательно под влиянием кристаллических структур. Здесь господствуют отношения, которые можно уподобить семейным. Познакомимся с этими интересными минеральными образованиями.

## СИМБИОЗ ИНДИВИДОВ

Индивиды срстаются геометрически закономерно, когда это происходит под влиянием кристаллических структур. Известно три типа закономерных срстаний: эпитаксии, параллельные сростки и двойники.

### Эпитаксия

Так называется закономерно ориентированное нарастание одного минерала на другой. Представление об эпитаксии дает рис. 31, а: видно, что наросшие кристаллики одинаково ориентированы на индивиде-основании — «матрице». Этим эпитаксические срстания отличаются от обычных, незакономерных сростков минералов, в которых взаимная ориентировка более или менее случайна, произвольна.

В царстве минералов явление эпитаксии не редкость: ориентированные нарастания кристалликов галенита на пирротин, халькопирита на галенит и сфалерит, пирита на марказит, кианита на ставролит — лишь немногие из широко известных примеров. В минералогической литературе описано более 400 эпитаксических пар, и, по всей вероятности, большую их часть еще предстоит открыть. Эпитаксия — не всегда «архитектура малых форм». Так называемый письменный гранит, слагающий обширные тела пегматитов, — не что иное как закономерное срстание кварца с полевым шпатом (рис. 31, б).

Эпитаксии могут возникать при любых минералообразующих процессах. Чаще всего (хотя и не обязательно) эпи-

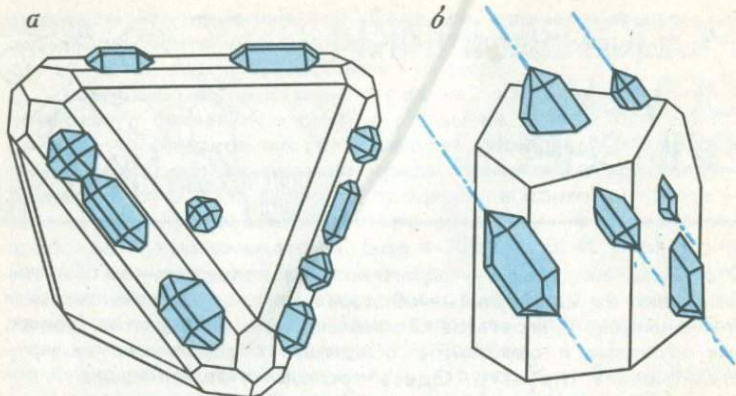


Рис. 31. Эпитаксические нарастания халькопирита на тетраэдрит [а], кварца на полевой шпат [б — по А. Е. Ферсману]

таксические пары принадлежат к одному классу химических веществ: оба — сульфиды, или оба — соли кислородсодержащих кислот и т. д.

Эпитаксическое срастание может образоваться двумя способами. Один — это ориентировка кристаллика в процессе его зарождения на поверхности минерала-матрицы, играющего в этом случае роль своеобразного катализатора зарождения. А. Е. Ферсман назвал такие минералы «индукторами», т. е. возбудителями. Другой способ заключается в самостоятельном возникновении зародыша и ориентировке его в тот момент, когда он оседает на грань матрицы. Зародившийся кристаллик разрастается преимущественно вдоль матрицы, вследствие чего приобретает вытянутый или уплотненный облик и может в конце концов покрыть матрицу сплошной «рубашкой».

Своеобразие облика — всегда информация к размышлению. Очевидно, разрастание вдоль матрицы дает какие-то удобства. Входящий угол по контуру прилегания зародыша к матрице выполняет роль той самой ступеньки, в которой так нуждается кристалл для своего роста. Но для того чтобы воспользоваться этой возможностью, эпитаксические партнеры должны обладать сходством кристаллических структур.

Искусственная эпитаксия играет очень важную роль в технологии современной микроэлектроники — получении тонких пленок полупроводниковых монокристаллов, изготовлении печатных схем, сверхминиатюрных приборов и интегральных микросхем. Исследования искусственной эпитаксии обогащают новыми представлениями и минералогию.

Почему происходит эпитаксия? Еще в 1908 г. В. И. Вернадский обратил внимание, что при эпитаксическом срастании возникает самая низкоэнергетическая поверхность раздела кристаллов. В связи с этим

эпитаксическое срастание может получить преимущество как перед образованием отдельного кристалла, так и перед случайным, неориентированным нарастанием. Поверхность матрицы (как и любого кристалла) представляет своего рода структурный дефект (нарушение однородности структуры, локализация свободной энергии), а эпитаксия этот дефект как бы залечивает, исправляет.

Для получения искусственных эпитаксических покрытий важно выяснить условия ориентированного нарастания. В 1928 г. французский ученый Л. Руайе установил, что расхождение в геометрических узорах срастающихся плоских сеток не должно превышать 15%. Но вскоре стали известны случаи эпитаксии и со значительно большими структурными различиями. В связи с этим возникло предположение, подтвержденное затем и опытными данными, что в процессе зарождения эпитаксическая пленка в прилегающем к контакту слое деформируется и структурно приспособляется к матрице. Если образование и деформирование эпитаксического зародыша требует меньших энергетических затрат, чем образование жизнеспособного самостоятельного зародыша, кристаллизация идет в виде эпитаксии. Соответствующие условия были найдены в 40-х годах советским исследователем П. Д. Данковым.

В образовании эпитаксических пар по второму способу — с ориентировкой готовых зародышей — по-видимому, большую роль играют активные центры поверхности кристалла, действие которых распространяется на расстояния в сотни параметров элементарной ячейки. Вероятно, активные центры представляют собой скопления структурных дефектов.

## **О чем поведал кварцевый скипетр**

С особенной легкостью возникают ориентированные срастания индивидов одного минерала — автоэпитаксия. Хрестоматийный пример такого срастания — скипетровидный кристалл кварца (рис. 32). Суть явления в том, что на взрослом призматическом кристалле зарождаются и растут кристаллы кварца нового поколения. Следовательно, автоэпитаксию нужно рассматривать как самостоятельное явление, а не просто как продолжение роста. Ориентированное зарождение происходит в местах концентрации поверхностной энергии кристалла-индуктора — на вершинах, разделяющих призму и ромбоэдрические грани головки. Разрастающиеся индивиды второго поколения смыкаются друг с другом и образуют эпитаксический венчик или утолщенную головку — «скипетр». Зарождение новых индивидов может быть связано с изменениями внешних условий. Об этом свидетельствует смена окраски (например, бесцветной на бурую или аметистовую).

Автоэпитаксические сростки известны и для многих других минералов, в частности апатита таблитчатого облика из минерализованных трещин (см. рис. 25).

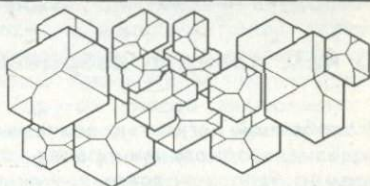
При автоэпитаксии кристаллическая структура младшего индивида продолжает структуру старшего, и оба составляют в сущности один кристалл. Все элементы структур индивидов



Рис. 32. Скипетровидный кристалл кварца. Березовское месторождение, Урал



Рис. 33. Параллельный сросток кварца. Якутия



расположены соответственно параллельно, вследствие чего одинаково ориентированы и элементы огранения — грани, ребра, вершины.

Автоэпитаксия — частный случай параллельного срастания. Такие срастания возникают по разным причинам. По крайней мере две из них нам уже известны: это регенерация излома (см. рис. 26, б) и смена габитуса (см. рис. 27), вызывающие многоголовый рост кристалла. Параллельные срастания могут образовываться при одинаковой ориентировке нескольких индивидов, эпитаксически нарастающих на одну матрицу, или из-за деления кристаллов по спайным направлениям. Так, параллельные сростки антимонита, известные на Кадамджайском месторождении, образовались за счет деления кристаллов по спайному направлению (010). Причиной было давление кварца, который кристаллизовался из раствора, проникавшего в тончайшие спайные трещинки.

На одном из хрустальных месторождений Якутии часто встречаются параллельные сростки кристаллов кварца вроде

того, что изображен на рис. 33. Чтобы убедиться, что это действительно параллельный сросток, достаточно взглянуть на образец с торца: шестиугольники поперечных сечений кристаллов ориентированы одинаково. В нижней части сростка можно разглядеть неясную затемненную полосу — она и расскажет нам его историю. Некогда жила состояла из крупнокристаллического и, возможно, сплошного кварца. Впоследствии она была раздроблена тектонической подвижкой, а затем наступил этап регенерации. Один из обломков крупного индивида — именно его следом и является полоса — в результате многоголового роста развился в сросток параллельно ориентированных кристаллов. Но небольшие отступления от параллельности заметны на нашем образце. В данном случае они обусловлены деформациями обломка; а вообще в параллельных сростках подобные отступления довольно часты. Так минерал сам рассказал нам свою биографию. Можно было бы добавить, что дорастание (регенерация) протекало в менее пересыщенном растворе, чем кристаллизация раннего кварца, — на это предположение наводит большая прозрачность кристаллов.

Стоит обратить внимание на следующую подробность. Как автоэпитаксия, так и многоголовый рост приводят к одному и тому же результату — параллельному срастанию. Но с генетической точки зрения это не совсем одно и то же. Автоэпитаксия начинается с ориентировки нового зародыша, тогда как многоголовый рост возможен при смене габитуса или регенерации взрослого кристалла. Параллельное срастание — термин сугубо морфологический: он обозначает просто сросток параллельно ориентированных кристаллов независимо от причины ориентировки.

## Цветы минерального царства

Кристаллы называют цветами минерального царства, и по справедливости этот эпитет должен быть адресован в первую очередь кристаллическим двойникам (рис. 34). Уже по одной этой причине они заслуживают подробного рассмотрения.

Как и параллельные сростки, двойники относятся к закономерным срастаниям одного минерального вида, в которых поверхность срастания принадлежит одновременно одинаковым плоским сеткам обоих индивидов. Но если в параллельных сростках структуры индивидов по обе стороны поверхности срастания продолжают друг друга и получают одна из другой простым параллельным переносом, то в двойниках они связаны осевой или зеркальной симметрией.

Поясним сказанное. На рис. 35, а изображена структура одиночного кристалла. Введем плоскость симметрии, перпендикулярную чертежу и пересекающую его по линии  $AA'$ , и выполним отражение левой части структуры; получим структуру двойника (рис. 35, б). Тот же результат получится, если прямой  $AA'$  придадим функцию оси симметрии второго по-

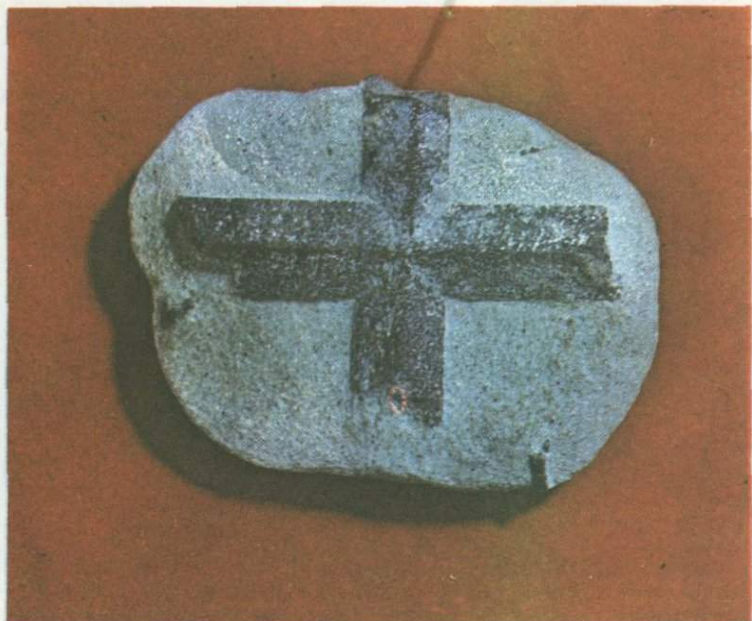


Рис. 34. Двойник ставролита. Кейвы, Кольский полуостров

рядка. Теперь попробуем то же самое проделать с прямой  $BB'$  или  $CC'$ . На этот раз структурный узор просто повторяется, продолжает сам себя. В чем же дело? Из изображения одиночного кристалла видно, что иного и нельзя было ожидать, так как  $BB'$  и  $CC'$  — это оси или плоскости симметрии, уже имеющиеся в структуре, а потому они и не могут внести ничего нового. Направление же  $AA'$  этих функций в одиночном кристалле не выполняет: мы их придаем этому направлению сами, и в результате получаем структуру двойника.

Итак, в двойниках соединены по меньшей мере два индивида одного минерального вида; в поверхности их сопряжения лежат частицы, общие для одинаковых плоских сеток того и другого индивида; индивиды связаны элементами симметрии, дополнительными к тем, которые уже имеются в одиночных кристаллах. Называются эти новые элементы симметрии двойниковой осью и двойниковой плоскостью. Своеобразной симметрией и обусловлена в первую очередь внешняя привлекательность двойников.

Но разобраться в сущности двойникования — еще не значит научиться распознавать двойники среди реальных кри-

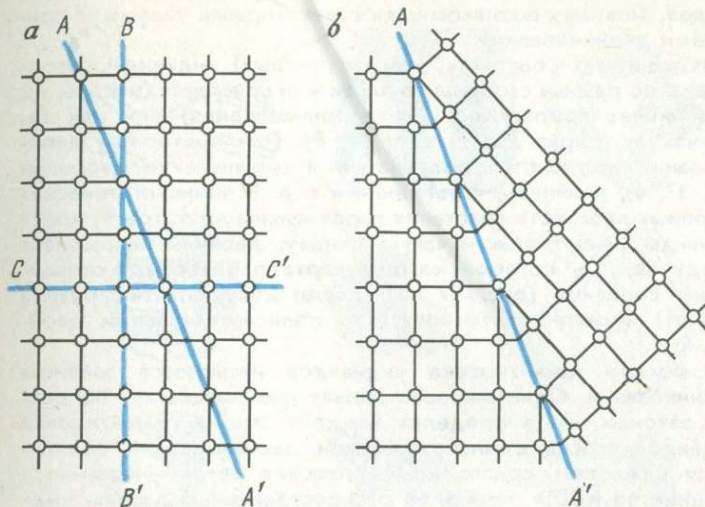


Рис. 35. Кристаллические структуры одиночного кристалла (а) и двойника (б)

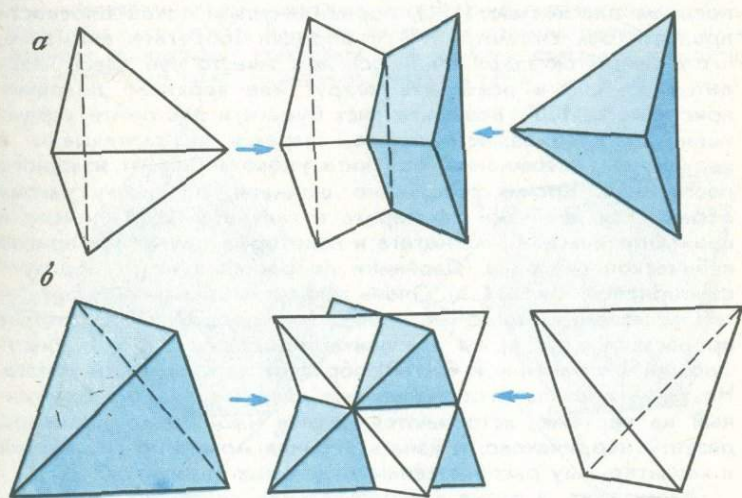


Рис. 36. Двойники срастания (а) и прорастания (б) тетраэдров

сталлов. Поэтому познакомимся с некоторыми типами и признаками двойникования.

В двойниках сростания (или контактных) индивиды расположены по разные стороны от плоскости сростания (рис. 36, а); в двойниках прорастания (или проникновения) они как бы пронизывают друг друга (рис. 36, б). При повторном двойниковании получаются коленчатые и циклические двойники (рис. 37, а), тройники, четверники и т. д. В полисинтетических двойниках плоскости сростания параллельны друг другу; когда индивиды имеют пластинчатую форму, двойник напоминает колоду карт, в которой каждая карта перевернута относительно соседних (рис. 37, б). Решетчатые сростки рутила (сагенит) и церуссита относятся к полисинтетическим двойникам.

Взаимная ориентировка индивидов называется законом двойникования. Один минерал может двойниковаться по разным законам, но в пределах каждого закона ориентировка индивидов всегда одинакова. Закон двойникования обозначается символом сростающихся плоских сеток — например, «двойник по (010)». Наиболее распространенные законы имеют свои названия — обычно по минералу или месту первой находки: шпинелевый двойник, карлсбадский двойник и т. п.

Двойники по шпинелевому закону — сростания по плоскости (111), т. е. вдоль грани октаэдра, свойственны многим минералам кубической сингонии. Фигуру, изображающую такой двойник, нетрудно построить (рис. 38): надо рассечь октаэдр пополам плоскостью (111), перпендикулярно этой плоскости провести ось симметрии 2-го порядка (обратите внимание, что в самом октаэдре такой оси нет: вместо нее здесь находится ось  $L_2$ ) и повернуть вокруг нее верхнюю половину кристалла на  $180^\circ$ . Возьмите лист бумаги и повторите упражнение от руки самостоятельно, стараясь не заглядывать в чертеж; вы, несомненно, получите удовольствие от изящного построения. Кроме собственно шпинели, по этому закону образуются двойники сфалерита и галенита (в том числе и полисинтетические), магнетита и некоторых других минералов кубической сингонии. Двойники прорастания часто образует флюорит (см. рис. 37, в). Очень эффектны двойники пирита — так называемые железные кресты (см. рис. 37, г), в которых прорастают друг друга два пентагондодекаэдра {210}. Участвующий в огранении куб {100} образует плоские части креста. Но такие правильно образованные двойники, как изображенный на чертеже, встречаются редко. Чаще всего индивиды развиты неодинаково, и узнать двойник можно по симметрии и характерному расположению отдельных индивидов.

Касситерит и рутил (тетрагональная сингония) двойникуются по касситеритовому закону, где плоскостью сростания служит грань дипирамиды {101} (рис. 37, д). Для рутила угол сростания таков, что при повторном двойниковании сросток

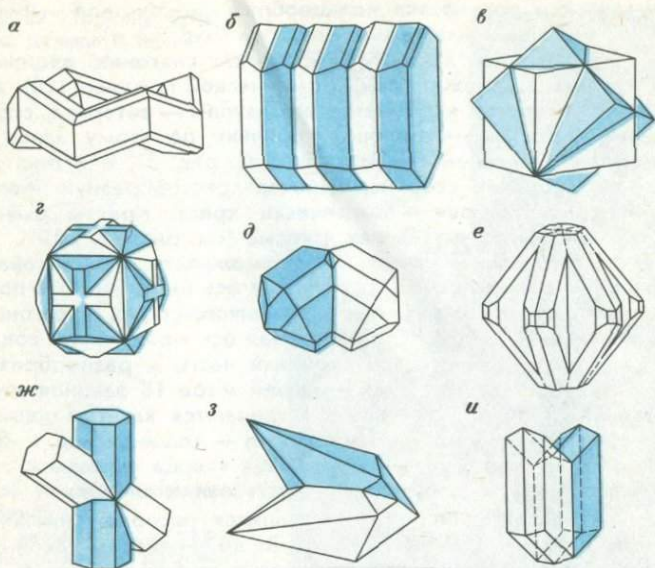


Рис. 37. Примеры кристаллических двойников:

а — циклический восьмерник рутила; б — полисинтетический альбитовый двойник плагиоклаза; в — двойник прорастания флюорита; г — «железный крест» — двойник прорастания пирита; д — двойник срастания касситерита; е — «арагонитовый» тройник церуссита; ж — двойник прорастания ставролита, з — двойник срастания кальцита; и — «ласточкин хвост» — двойник срастания гипса

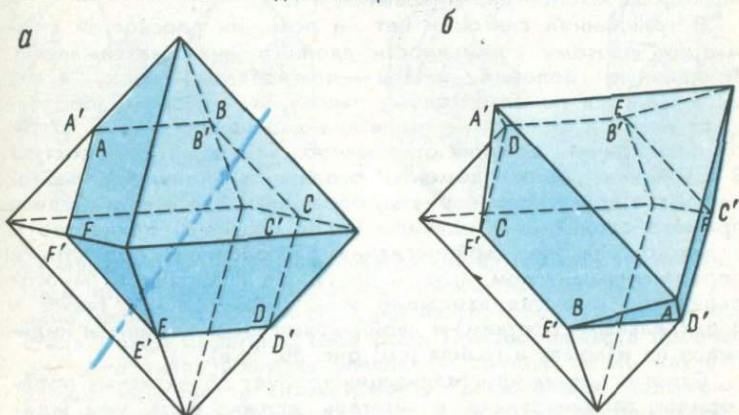


Рис. 38. Октаэдр (а) можно преобразовать в «шпинелевый» двойник (б) поворотом одной половины кристалла вокруг специально введенной оси симметрии  $L_2$

замыкается и получается кольцеобразный кристалл — циклический шестерник или восьмерник (см. рис. 37, а).

В арагонитовом законе (ромбическая сингония) двойниковой плоскостью служит грань ромбической призмы  $\{110\}$ . Для арагонита и других карбонатов его группы — витерита, стронцианита, церуссита — типичны тройники по этому закону с псевдогексагональной симметрией (см. рис. 37, е и рис. 39). Ставролит получил свое название за крестообразную форму двойников: «ставрос» — по-гречески крест. Кресты бывают как прямые (см. рис. 34), так и косые (см. рис. 37, ж).

В гексагональной сингонии возможности двойникового уменьшены в связи с тем, что главная ось имеет четный порядок и поэтому не может служить двойниковой осью. В тригональной сингонии — наоборот: двойниковая ось может быть совмещена с главной осью  $L_3$ , и двойники часты и разнообразны. Так, для кварца описано по меньшей мере 18 законов двойникового, причем чаще всего встречаются как раз двойники с совмещенными главными осями — дофинеиские и бразильские. Особенности двойникового кварца связаны с тем, что его структура допускает существование «левых» и «правых» кристаллов, внешне отличающихся расположением небольших граней  $x$  (рис. 40, а). В дофинеиском двойнике прорастают друг друга два одинаковых индивида (рис. 40, б), в бразильском — левый и правый (рис. 40, в). На рис. 37, з показан один из двойников сростания кальцита.

В моноклинной сингонии законы двойникового разнообразны и многочисленны «ласточкины хвосты» (см. рис. 37, и) и другие двойники гипса; различные двойники полевых шпатов, в том числе сложные, в которых одновременно сочетаются несколько законов двойникового, и т. д.

В триклинной сингонии нет ни осей, ни плоскостей симметрии, поэтому возможности двойникового максимальны. Триклинные полевые шпаты — плагиоклазы — чаще всего двойникуются по альбитовому закону, по которому образуются также и их полисинтетические двойники (см. рис. 37 б).

Как отличить двойник от обычного кристалла или сростка? В двойниках одни элементы огранения индивидов параллельны, а другие перевернуты, обращены. Это и есть главная примета двойников. Индивиды в них огранены одинаково и в каждом законе двойникового расположены под строго определенным углом друг к другу. На поверхности многих двойников имеются входящие углы (свойственные также и параллельным сросткам) и двойниковые швы — границы индивидов на изломах и гранях (см. рис. 40, б, в).

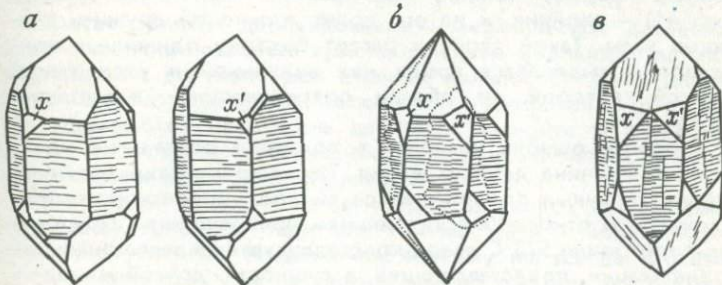
Строгая логика кристаллизации требует объективных предпосылок двойникового, и читатель, должно быть, уже ждет объяснения. Входящие углы двойников — вот в чем дело. Они выполняют роль той самой ступени, на которой осаждение частиц облегчено по сравнению с гладкой гранью. Для роста

Рис. 39. Тройник арагонита. Куэнка, Испания



Рис. 40. Двойникование кварца:

а — левый и правый кристаллы; б — дофинейский двойник; в — бразильский двойник



входящие углы двойников еще удобнее, чем при эпитаксии — ведь структуры индивидов полностью идентичны. По сути дела, двойникование — это один из способов, которыми кристалл может облегчить себе рост. Предположим, в процессе роста возникла «ошибка упаковки»: группа частиц случайно заняла не свое, а симметричное, двойниковое положение. Благодаря появлению входящего угла такая ошибка энергетически выгодна, надобности в ее исправлении нет. Рост продолжается с двойниковой упаковкой частиц, и отложение вещества идет преимущественно во входящих углах (см. схему

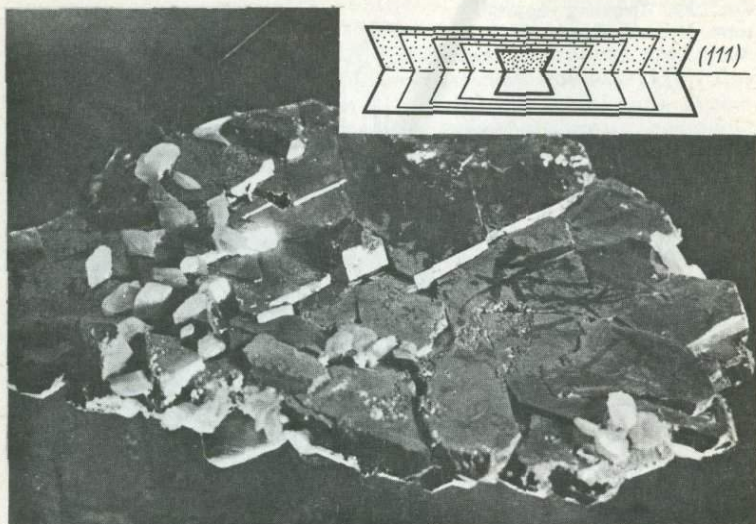


Рис. 41. Таблитчатый двойник галенита по шпинелевому закону. Сихотэ-Алинь

на рис. 39). Из-за этого двойники иногда приобретают уплощенную форму. Тонкий, как фанера, кристалл галенита (рис. 41) — двойник, и на его краях можно обнаружить входящие углы. Такой двойник растет быстрее одиночных кристаллов и выделяется среди них величиной и уплощенной формой, которой он обязан опережающему нарастанию внутри углов.

Впрочем, ошибки упаковки в процессе роста — не единственная причина двойникования. Так, дофинейские двойники кварца (типичные для кристаллов высокотемпературного происхождения) относятся к «двойникам превращения». При температурах выше  $573^{\circ}\text{C}$  кварц кристаллизуется в гексагональной модификации, представляющей, в сущности, другой минерал. С понижением температуры он переходит в обычную, знакомую всем тригональную модификацию. Превращение связано с перестройкой структуры готового кристалла, что представляет задачу не из легких. Оптимальный выход из положения — перестраиваться отдельными структурно симметричными, сдвойникованными участками. Структура как бы складывается «гармошкой» — такая перестройка проще, чем перестройка целиком, и требует меньших энергетических затрат. Для дофинейских двойников характерны сложные границы индивидов, извилистые двойниковые швы. Внешнюю форму кристалл наследует от гексагонального кварца. Такие псевдо-

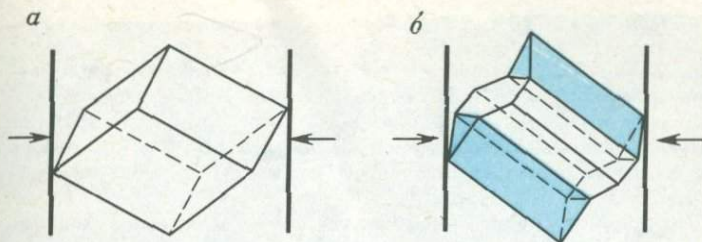


Рис. 42. Механическое двойникование кальцита.

а — кристалл до двойникования; б — кристалл после двойникования

морфозы, отличающиеся от первоначального минерала только кристаллической структурой, называются «параморфозами».

В образовании некоторых двойников превращения заметную роль играют химические примеси. Один из кальциевых цеолитов — стеллерит — образуется при довольно высоких температурах в кристаллах ромбической сингонии. Если кристаллы чистые, то они сохраняются и при охлаждении. При наличии примеси натрия кристаллическая структура с понижением температуры становится неустойчивой, и минерал переходит в моноклинную форму — стильбит. Переход сопровождается двойникованием. В связи с этим для стильбита обычны двойники превращения, тогда как для стеллерита двойники не характерны.

Третья причина двойникования — механическое давление. Двойникование позволяет кристаллическим индивидам за счет деформации до некоторой степени приспособиться к давлению, частично «сбросить» механические напряжения (рис. 42). Так образуются некоторые двойники кальцита и доломита (в том числе полисинтетические) в зернах мраморов и метаморфизованных, перемятых известняков.

Как видим, двойникование — одна из уловок чрезвычайно экономной природы ради все той же цели — минимизации свободной энергии. И двойники поэтому не всегда встречаются именно там, где их скорее можно ожидать по геометрическим и структурным соображениям.

## ИНДИВИД РАСЩЕПЛЯЕТСЯ

Интересные минеральные образования возникают при расщеплении кристаллов — явлении, чрезвычайно распространенном и изученном далеко еще не до конца.

## Кристаллическая семья

Расщепленный кристалл построен из отдельных частей — субиндивидов (рис. 43). Соответственные ребра, а иногда и грани субиндивидов расположены двойко: одни параллельны, а другие несколько разориентированы и веером отклоняются друг от друга на небольшие углы. Это и есть главный признак расщепленных кристаллов.

Для сравнения вспомним, как устроены другие «семейные» сростки. В параллельных сростаниях все элементы огранения индивидов соответственно параллельны, в двойниках — одни элементы параллельны, а другие обращены. Выходит, расщепленные кристаллы — как бы промежуточный случай. Принципиальное их отличие и от двойников, и от параллельных сростаний — обилие структурных дефектов. Это — вторая главная примета расщепленных кристаллов.

Накопление дефектов происходит во время роста кристалла. Множественные дислокации разбивают структуру на отдельные блоки (рис. 44, а), что придает индивиду некоторое сходство с минеральным агрегатом. В той или иной мере блочное строение свойственно всем реальным кристаллам. Но обычно оно не заметно на глаз и лишь изредка проявляется в специфической « мозаичной » скульптуре граней, наподобие той, что хорошо видна на кристалле галенита (см. рис. 41). Мозаичность граней — начало обособления субиндивидов, их относительно самостоятельного развития. Призматический мозаичный кристалл далее развивается в пучок (см. рис. 43), кубы и ромбоэдры принимают седловидную форму (см. рис. 44, б), иногда образуются эффектные « сростки » субиндивидов типа « розы » (рис. 45). Когда расщепление идет сразу с обоих концов, образуется сноповидный сросток (см. рис. 43 и 44, в). Такие сростки очень характерны для стильбита, в связи с чем возникло его прежнее название « десмин » — от греческого слова, обозначающего сноп.

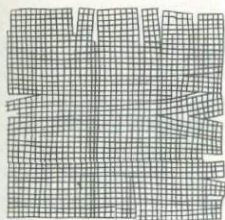
При дальнейшем расщеплении сноп развивается в двулистник (см. рис. 44, с). Когда концы двулистника или седла смыкаются, получается сферокристалл (см. рис. 44, д). В сферокристаллах встречаются многие минералы: карбонаты сидерит и родохрозит, цеолиты гейландит, стильбит, стеллерит, некоторые слюды — так называемый « барботов глаз » (рис. 46) и др. Неповторимой прелестью отмечены сферокристаллы малахита из Джезказганского месторождения (см. рис. 46).

Но гораздо чаще малахит встречается не в сферокристаллах, а в сферолитах (см. рис. 44, е). Сферолиты получают, когда расщепление идет весьма интенсивно, иногда до тончайших волокон. Как раз такой малахит и представляет интерес как поделочный камень. Сферолиты — наиболее распространенная форма расщепления многих минералов:

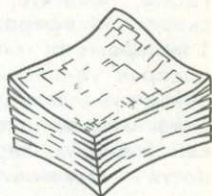
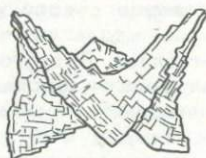


Рис. 43. Расщепленные кристаллы кварца: пучок [слева] и сноповидный сросток [справа]. Дашкесан, Азербайджанская ССР

*a*



*b*



*в*



*г*



*д*



*е*

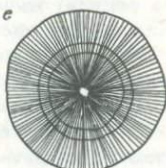


Рис. 44. Блочное строение [а] и формы расщепления кристаллов: седло (б), сноповидный сросток (в), двулистник (г), сферокристалл (д), сферолит (е)



Рис. 45. «Роза» стильбита. Эвенкийский автономный округ

гётита, гематита, аурипигмента (рис. 47) и др. Халцедон — скопление сферолитов кварца с волокнами толщиной 0,1—1 микрометр, вытянутыми вдоль оси симметрии  $L_2$ , т. е. поперек удлинения кристаллов. В другой сферолитовой разновидности кварца — кварцине — волокна вытянуты вдоль удлинения кристаллов. Халцедоны с красивой природной окраской (карнеол, сердолик, сардер и др.) и их слоистые разновидности — агат и оникс — используются в ювелирном деле. Белые слои оникса, традиционного материала для вырезания камей, часто состоят из кварцина.

Как видим, формы расщепления кристаллов многочисленны. Но при всем своем разнообразии расщепленные кристаллы всегда состоят из объединенных в одно целое субиндивидов и имеют отклонения от закона постоянства углов, что сближает их с агрегатами. Однако в отличие от агрегатов они получаются не срастанием разных кристаллов, а наоборот, «разрастанием» одного, и это роднит их с индивидами. Поэтому называть «розы», «снопы» и другие расщепленные формы сростками можно лишь условно. И еще одно: несмотря на разориентировку субиндивидов, в плоскости рас-



**Рис. 46.** «Барботов глаз» лепидолита. Казахстан (справа); сферокристаллы малахита. Джекказганское месторождение (слева)

щепления (перпендикулярной направлению преимущественного роста) углы сохраняются такими же, как и на исходном кристалле (рис. 48).

О двойственной природе расщепленных кристаллов говорит и их внутреннее строение: нерасщепленное ядро с единой, как у монокристалла, структурой, — и постепенный переход по периферии в структурные блоки и обособленные субиндивиды (см. рис. 44, а).

Расщепленными формами представлены все классы минералогической систематики. Расщепление может происходить в любой геологической обстановке, но наиболее типично оно для низких температур кристаллизации — вблизи земной поверхности, в пещерах, низкотемпературных гидротермальных жилах и т. п. Форма расщепления всегда соответствует симметрии исходного кристалла, направлению его скорейшего роста и интенсивности расщепления. Замечено, что тип и степень расщепления могут быть разными в разных месторождениях данного минерала, но в пределах даже одной полости расщепление как правило однотипно.



Рис. 47. Сферолит аурипигмента. Западная Грузия

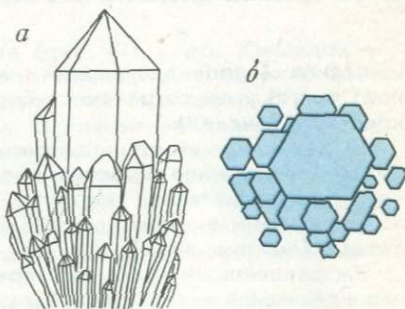


Рис. 48. Расщепленный кристалл кварца: субиндивиды разориентированы относительно направления наибольшего роста (а), но сохраняют параллельную ориентировку в поперечном направлении (б)

## Как происходит расщепление?

Загадка расщепленных кристаллов давно не дает покоя минерологам и кристаллографам. Почему происходит расщепление? Как оно связано с условиями кристаллизации? Каковы закономерности появления расщепленных форм?

Твердо установлено, что расщепление возникает только во время роста кристалла и сильнее всего в направлении преимущественного роста; ему способствует быстрая кристаллизация из сильно пересыщенного раствора; для расщепленных кристаллов характерны множественные структурные дефекты и включения примесей.

Когда кристалл растет, на его поверхности под влиянием накапливающихся дефектов зарождаются структурные блоки, по мере роста разделяющиеся на блоки следующего поколения и т. д. Разориентировка нарастает, и это должно в конце концов вести к обособлению субиндивидов. Образуются новые поверхности, кристалл одновременно освобождается от «лишних» дефектов. Он как бы выбирает меньшее из двух зол: развитая поверхность удерживает больше свободной энергии, но все же не так много, как большое количество дефектов. Границы блоков — это стоки энергии, а расщепление — приспособительная реакция кристалла на внешние условия, вызывающие быстрый рост, что неизбежно связано с увеличением несовершенства структуры. Само собой разумеется, что при таких обстоятельствах кристалл расщепляется больше именно с той стороны, где он быстрее растет.

Таким образом, обособление субиндивидов — естественный результат эволюции кристалла, растущего в условиях накопления дефектов. Рано или поздно такой кристалл принимает расщепленную форму. Как это происходит? Недавно группа ленинградских ученых (Ю. Н. Пунин, Т. П. Ульянова и др.) исследовала в опытах с искусственными веществами зависимость обособления субиндивидов от пересыщения раствора. Оказалось, что с понижением пересыщения время, требуемое для обособления субиндивидов, сначала постепенно возрастает, а затем сразу резко увеличивается и становится соизмеримым с временем кристаллизации. Иначе говоря, при каком-то нижнем «критическом» пределе пересыщения обособление субиндивидов становится невозможным. По мнению исследователей, процесс носит цепной характер: обособление первых субиндивидов способствует обособлению субиндивидов следующих поколений. Во время роста кристалл неизбежно подвергается механическим напряжениям. Причины этого различны: захват примеси, взаимодействие с препятствием — соседним кристаллом, стенкой полости, собственной подложкой и т. п. Все это может послужить поводом для обособления первых субиндивидов. При достаточно высоком пересыщении напряжения вызывают в растущем кристалле размножение дислокаций, что приводит к блокированию структуры, и в конце один из субиндивидов обособливается. С этого момента кристалл больше не нуждается в постороннем источнике механических напряжений: эту роль выполняет отделившийся субиндивид. В зазоре между ним и кристаллом начинается отложение кристаллизующегося веществ-

ва, вследствие чего развивается давление, и субиндивид превращается в своего рода рычаг. Возникающие в его основании напряжения при достаточно высоком пересыщении раствора приводят к зарождению блоков, обособлению субиндивидов следующего поколения и т. д. При этом кристалл избавляется от избытка свободной энергии, структура его исправляется, сокращается число лишних дефектов, неизбежно возникающих при росте в сильно пересыщенном растворе.

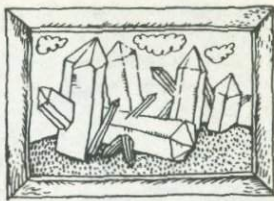
Как упоминалось, выводы ленинградских ученых основаны на лабораторных экспериментах. А о чем говорят наблюдения над природными кристаллами? Классический пример расщепленных кристаллов — халцедон. В агатовых жеодах халцедон нарастал слой за слоем на стенки полости, а в некоторых агатах на внутренний слой халцедона нарастали кристаллы кварца. Таким образом, в одном агрегате минерал находится и в расщепленной, и в нерасщепленной форме. Обратная последовательность — сначала кварц, затем халцедон — наблюдается сравнительно редко. Отложение слоев халцедона, видимо, происходило из сильно пересыщенного раствора. В расщеплении свою роль играли частички примесей, в изобилии находящиеся в халцедоне (обычно им он и обязан своим цветом). С истощением раствора пересыщение в конце концов снизилось до критического, и расщепление с образованием сферолитов стало невозможным. Однако кристаллизация все еще могла продолжаться, и далее кварц выделялся уже в виде нерасщепленных кристаллов. Резкая, а не постепенная смена халцедона кварцем связана с пороговым, критическим характером зависимости обособления от пересыщения раствора.

Но пока проблема расщепленных кристаллов остается дискуссионной, и станет ли изложенная точка зрения общепризнанной — покажет будущее.

В связи с тем что форма расщепленных кристаллов, особенно сферолитов, резко неравновесна, они могут при благоприятных условиях перекристаллизовываться в зернистые агрегаты.

Расщепленные кристаллы — один из интереснейших разделов морфологии минералов, особенно ярко демонстрирующий сложность и динамичность развития природных индивидов.

# ЭТЮДЫ ОБ АГРЕГАТАХ



Царство минералов организовано в «коллективы». Индивиды объединены в агрегаты, агрегаты — в более сложные минеральные тела. В свою очередь, индивиды образованы коллективами структурных блоков. Далее следуют коллективы атомов, элементарных частиц... Налицо иерархия коллективов, соподчинение уровней организации вещества. Всякий минеральный коллектив — единое целое со своими внутренними взаимосвязями, со своей упорядоченностью — от строго определенных положений атомов в структуре кристалла до более или менее случайной — но отнюдь не произвольной — ориентировки индивидов в агрегате.

Коллективы, или на современном языке кибернетики «системы», в минералогии изучают на уровне агрегатов, а в роли составных элементов выступают индивиды. Как устроен агрегат? Как он образовался? — вот два главных вопроса, интересующие минералога. Его цель, как и при изучении индивидов, — раскрыть причинную связь между происхождением и формой. В агрегатах эта связь прослеживается еще более отчетливо.

Строение минерального агрегата характеризуется структурой (не следует путать с кристаллической структурой!), указывающей на форму, размеры, взаимное расположение составных элементов. Но этого мало: качества агрегата как системы нельзя свести только к качествам составных частей — как не сводится к сумме органов и тканей живой организм, к сумме строительных элементов — построенное из них здание. Нужно знать еще и «архитектуру» агрегата — как распределены и как соотносятся структуры его частей во всем его пространстве. Эта характеристика называется текстурой. Она должна давать представление об агрегате в целом, как об ансамбле взаимосвязанных частей.

## МИНЕРАЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ

Известно много типов минеральных агрегатов. Но еще задолго до того, как началось их научное изучение, и даже раньше, чем сформировалась сама минералогическая наука в совре-

менном смысле слова, горняки и «геогносты» присвоили некоторым минеральным агрегатам простые и удобные названия, руководствуясь только их внешними приметам. Многие пришедшие из практики названия оказались содержательными и укоренились в науке. Такие определения, как «друзовый», «радиально-лучистый», «шестоватый» сохраняются в лексиконе минералогов уже не одно столетие, и нет повода заменять их другими.

А нужно ли специально изучать минеральные агрегаты? Разве не достаточно ограничиться составляющими их индивидуидами?

Как мы уже выяснили, отдельные признаки агрегатов присущи и закономерным сростаниям — эпитаксическим и параллельным сросткам, расщепленным кристаллам, двойникам. Принципиальное отличие агрегатов состоит в том, что они возникают из многих центров роста, в которых отдельные индивидуиды начинают расти самостоятельно и независимо друг от друга. Затем наступает фаза коллективного роста: индивидуиды объединяются в агрегат и растут вместе, подчиняясь общим законам развития. Для сравнения вспомним, что расщепленный кристалл развивается в обратной последовательности: одиночный индивидуид «размножается» в семью субиндивидуидов, обретающих все большую самостоятельность и независимость друг от друга. С началом коллективного роста возникают новые качества, которых нет и не может быть в индивидуидах.

Агрегат — ансамбль взаимосвязанных и, как правило, однотипных индивидуидов. Но одни и те же индивидуиды могут объединяться в различные агрегаты — смотря по обстоятельствам. Ради выяснения этих обстоятельств минералог и изучает агрегаты: учится классифицировать и расшифровывать структуры и текстуры, выявлять способы и причины возникновения агрегата как упорядоченной системы, коллектива.

Такова цель. А каковы средства? Если исследование индивидуидов основано на данных и методах физики твердого тела, кристаллографии, экспериментах по кристаллизации, то в изучении агрегатов минералогам в гораздо большей степени приходится рассчитывать на собственные, специфические методы, а стало быть, постоянно работать над их совершенствованием. Но единое учение о минеральных агрегатах пока еще только создается. Поэтому и назван этот раздел «этюдами».

## **Любимцы коллекционеров**

Лучшие украшения минералогических выставок, музеев, коллекционных собраний — это, без сомнения, друзья минералов (рис. 49). Все любят друзья, и уж во всяком случае всем известно, что это такое; но формальное определение все-



Рис. 49. Друза кристаллов пирита. Акчатау, Казахстан

таки не будет лишним: друзой называется агрегат индивидов, обладающих собственной (идиоморфной) формой и начавших свой рост в независимых положениях на общей поверхности (подложке). Два отмеченные качества и составляют главным образом привлекательность друз: кристаллическая правильность индивидов в сочетании с их несколько хаотическим расположением — как бы намек на ту грациозную небрежность, с какой природа обращается со своими сокровищами.

Происхождение термина «друза» теряется в истоках науки о минералах. Скорее всего, его родиной были Рудные горы Саксонии. «Отец» описательной минералогии А. Г. Вернер пользовался им в своих сочинениях, лекциях и наставлениях для саксонских горняков. «Друза» — по-немецки означает щетка, и оба эти слова часто употребляют по одному и тому же поводу. Как мы далее увидим, термин «щетка» удобнее использовать несколько иначе.

При всем изяществе друз много распространяться о них нет нужды: они относятся к сравнительно простым агрегатам. Собственная кристаллическая огранка индивидов говорит о росте в свободном пространстве. Каждый индивид имеет также участки индукционных поверхностей совместного роста с

соседними индивидами и отпечаток подложки, на которой выросла друза. Свободная, идиоморфная часть индивидов несет обычную информацию: признаки особенностей роста, симметрии питания и растворения, ориентировки в пространстве. Коллективизация сводится к срастанию индивидов при их более или менее самостоятельном развитии в одном агрегате.

Бывает, что друза сложена индивидами разных возрастов. О том, какие из них старше, какие — моложе, можно судить по взаимному расположению: кристаллы младшего поколения зарождаются и растут на старших, несут их отпечатки, заполняют пространство между ними.

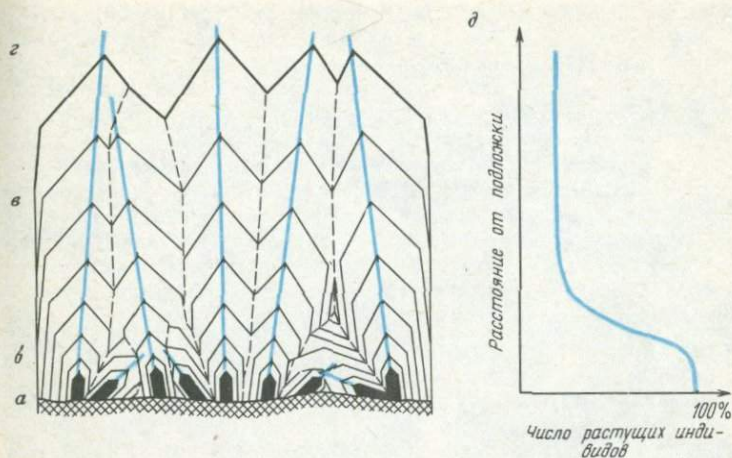
Друзовая форма выделения свойственна большинству минералов, выросших в природных полостях. Сравнительно редки друзы прозрачных кристаллов арагонита, берилла, топаза, рубина, сапфира, лазурита, титанита, некоторых других минералов.

Стоит призадуматься над тем, почему в перечне заметное место занимают дорогие самоцветы. Предыстория друзы, как, впрочем, и любого агрегата, — возникновение множества центров кристаллизации, что говорит об известной «спешке» кристаллообразования. Но шедевры — всегда единичны. Для соблюдения кондиций самоцветы должны расти очень долго, в условиях стабильных и близких к равновесным. «Природа, действуя спокойно и медленно, способна на необыкновенное», — заметил Гете.

## **Геометрический отбор: выживаемость и самоорганизация**

Красота камня и строгость кристаллических форм внушают мысль о чем-то конечном, уравновешенном, незыблемом. В отношении друз это впечатление обманчиво: они олицетворяют как раз состояние неустойчивое, переходное.

Как развивается друза? Сначала зарождаются и растут сразу много кристалликов; расположение их в пространстве и взаимная ориентировка случайны (рис. 50, а). Пока это еще не агрегат, а отдельные индивиды, растущие независимо друг от друга. Проходит время; разрастающиеся кристаллы один за другим начинают соприкасаться и срастаться: получается друза (рис. 50, б). А что будет при дальнейшем росте? Кристаллы, расположенные вдоль подложки (т. е. растущие в этом направлении быстрее всего), вскоре упрутся в своих соседей, и рост их прекратится, они зарастут более удачливыми партнерами. На рисунке читатель может проследить, как та же участь рано или поздно постигает и все кристаллы, растущие наклонно к подложке. В конце концов продолжать рост будут только те индивиды, которые быстрее всего растут перпен-



**Рис. 50. Образование и дальнейшая эволюция друзы:**

а — рост отдельными кристаллами; б — друзовый агрегат; в — параллельно-шестоватый агрегат; г — щетка; д — график геометрического отбора

дикулярно подложке и поэтому не мешают друг другу (рис. 50, в).

Мы стали свидетелями самоорганизации системы индивидов: из случайного, хаотического срастания — друзы — возник параллельно-шестоватый агрегат. В царстве минералов подобное самоупорядочение — явление вполне обычное, но тем не менее оно достойно пристального внимания: ведь взаимодействуют предоставленные самим себе неодоушевленные предметы. В 20-х годах известный советский кристаллограф А. В. Шубников дал описанному явлению название геометрического отбора, а в 1949 г. академик А. Н. Колмогоров разработал его математическую теорию. Свободная поверхность получившегося агрегата называется щеткой (рис. 50, г).

Для полноты картины построим рядом с нашей схемой график: по вертикали будем откладывать расстояния от подложки, по горизонтали — долю продолжающих рост индивидов (рис. 50, д). В пределах некоторого расстояния число индивидов не меняется, все зародившиеся кристаллы растут. Затем рост вступает в стадию геометрического отбора и число растущих индивидов постепенно сокращается. В стадии параллельно-шестоватого роста число индивидов снова не меняется, так как механизм геометрического отбора перестает действовать. Из графика видно, что между друзой и параллельно-шестоватым агрегатом нет резкого перехода: один агрегат постепенно перерастает в другой.

Своеобразные друзы возникают, когда в процесс коллективизации индивидов вмешивается ориентирующее влияние подложки. Так происходит, например, нарастание кварца на халцедон. В данном случае подложка состоит из того же минерала, поэтому кристаллы кварца нарастают по правилу автоэпитаксии и в соответствии с кристаллографической ориентировкой волокон халцедона располагаются по касательным к поверхностям сферолитов. Такие агрегаты иногда встречаются в халцедоновых жеодах Подмосковья. В стадии геометрического отбора преимущество получают кристаллы, выросшие по границам сферолитов. Формируется грубощестоватый агрегат, в котором количество индивидов в какой-то степени определяется количеством сферолитов подложки.

## **Бывает и по-иному**

Параллельно-шестоватые агрегаты, возникающие при эволюции друз, отличаются упорядоченной, кристаллографически одинаковой ориентировкой индивидов. Так, в агрегате кварца, прошедшем геометрический отбор, все «шестики» вытянуты вдоль главной оси  $L_3$ , как направления наибольшего роста, и располагаются этими осями параллельно друг другу и перпендикулярно подложке. Такие агрегаты растут в свободных полостях, а упорядочение возникает в ходе геометрического отбора.

Но параллельно-шестоватые агрегаты формируются не только описанным способом. Второй тип таких агрегатов возникает при коллективном росте индивидов в стесненном пространстве — узкой щели, трещине. Еще на стадии друзового роста, прежде чем вступит в действие регулирующий механизм геометрического отбора, индивиды дорастают до противоположной стенки и упираются в нее. На этом рост может остановиться, и тогда получится друзовый агрегат. Но если трещина постепенно открывается, то рост агрегата может продолжаться, а его строение будет зависеть от скорости открывания. Если трещина открывается быстро и растущие кристаллы не могут догнать противоположную стенку, возникает геометрический отбор, приводящий к образованию агрегата первого типа. Но допустим, что трещина открывается медленнее, чем растут кристаллы. Тогда все они получают равные шансы, так как растут лишь постольку, поскольку освобождается место. Возникает кристаллографически неупорядоченный параллельно-шестоватый агрегат второго типа. Он также состоит из параллельных шестиков, но вытянуты они в самых разных кристаллографических направлениях; зона геометрического отбора отсутствует, нет и свободной поверхности — щетки, агрегат заполняет трещину целиком, от одной стенки до другой. Питание осуществляется раствором, цир-

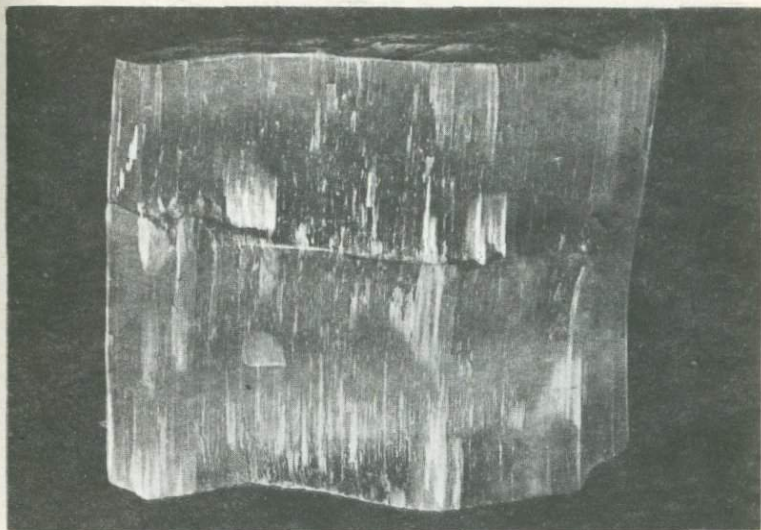


Рис. 51. Параллельно-шестоватый агрегат гипса — селенит. Таджикистан

кулирующим по порам породы, чаще со стороны той стенки, в направлении которой растет агрегат.

Наконец, бывает и так, что трещина раздвигается самим растущим агрегатом. Работа раздвигания совершается так называемым кристаллизационным давлением. Оно обусловлено выделением из раствора твердого вещества, т. е. развивается за счет энергии, освобождаемой при кристаллизации. При этом формируются параллельно-шестоватые агрегаты третьего типа — так называемые «жилы с просечкой». В таких жилах встречаются, в частности, хризотилковый и амфиболовый асбесты и волокнистая разновидность гипса — селенит (рис. 51). В параллельно-шестоватом агрегате третьего типа волокна вытянуты параллельно друг другу и перпендикулярно стенкам трещины, вмещающей жилу; в средней части имеется тонкая «просечка», где минерал жилы находится в виде друзового агрегата, обычно содержащего также мелкие посторонние включения. Агрегаты третьего типа кристаллографически упорядочены и этим похожи на агрегаты первого типа. Отличие — в просечке и отсутствии щетки.

Долгое время эти агрегаты оставались загадкой. Непонятны были постоянное присутствие просечки, расположение друзовой части в середине агрегата, а не на одном из контактов с породой, и быстрая переориентация индивидов, несмотря на малую ширину зоны геометрического отбора. В 1967 г.

московский минералог А. Г. Жабин показал, что в формировании агрегатов третьего типа большую роль играет индукторный механизм ориентации индивидов — автоэпитаксия.

Биография агрегата начинается с образования будущей просечки — тонкого друзового прожилка, кристаллизующегося в узкой трещине. Дорастая до стенок, индивиды начинают оказывать на них кристаллизационное давление. А оно может быть внушительным: в экспериментах установлены величины до  $200 \text{ Н/см}^2$  и даже больше. Это значит, что на каждом квадратном метре площади жилы в обе стороны могут действовать раскливающие усилия по 200 т. Для сравнения скажем, что пол современного дома с железобетонными перекрытиями допускает в 1000 раз меньшую нагрузку. Возникшего усилия во многих случаях достаточно, чтобы хотя бы немного расширить трещину за счет уплотнения породы.

Тем временем в тесном пространстве прожилка идет геометрический отбор. Он сопровождается ростом новых индивидов, которые при своем зарождении эпитаксиально ориентировались вдоль господствующего положения кристаллов — перпендикулярно к стенке трещины. Видимо, следует также допустить, что в условиях, когда стенки оказывают сопротивление росту агрегата, геометрический отбор может дополнительно регулироваться тем, что максимальное кристаллизационное давление развивается в направлении наибольшего роста кристаллов. Если сопротивление стенок достаточно велико, рост агрегата тормозится и заканчивается на стадии геометрического отбора. В противоположном случае сопротивление стенок преодолевается прежде всего теми индивидами, которые расположены поперек прожилка и, следовательно, в этом направлении могут развить наибольшее усилие. Наклонно же ориентированные индивиды, наоборот, подавляются сопротивлением стенок. Геометрический отбор и самоупорядочение агрегата завершаются раньше, чем в свободно растущей друзе. После этого в обе стороны дружно растут шестоватые индивиды, морфологически и кристаллографически ориентированные параллельно друг другу и перпендикулярно к трещине.

Индивиды перестроились в новый порядок, обеспечивающий им наибольшую эффективность совместных усилий, а значит, наибольшую возможность роста. За счет возросшего кристаллизационного давления агрегат раздвигает стенки трещины, приподнимает горизонтальные пласты, и прожилок со временем превращается в жилку, сплошь заполненную параллельно-шестоватым агрегатом, в котором заключена тонкая друзовая просечка. Питающий раствор поступает к агрегату по обоим контактам с породой — обычно по одному немного больше, чем по другому. Так, при росте селенита в пластовых жилах сила тяжести улучшает поступление питающего раствора к верхнему контакту и одновременно ослабляет питание

нижнего контакта. Вследствие этого параллельно-шестоватый агрегат селенита обычно растет несколько быстрее вверх, а просечка смещена вниз от середины.

Селенит, красивый поделочный камень теплых оттенков с шелковистым, переливчатым блеском, встречается на многих месторождениях Поволжья, Средней Азии и др. На Урале его издавна используют для изготовления декоративных фигурок и украшений. Старинный камнерезный промысел возник на базе Кунгурского месторождения селенита в Пермской области.

А вот и другие представители — «тигровый глаз» и «соколиный глаз». Если эти камни окажутся у вас в руках, приглядитесь к ним внимательнее. Вы без труда узнаете параллельно-шестоватые агрегаты, а если повезет, обнаружите тоненькую просечку — признак агрегата третьего типа. Соколиный глаз состоит в основном из кварца, заместившего прожилки крокидолитового асбеста. Остатки волокон асбеста придают ему синий цвет. Если же крокидолит предварительно подвергся выветриванию, то волокна окрашиваются налетами и зернышками гётита, и синий цвет меняется на золотистый; после замещения кварцем получается тигровый глаз. Эти красивые камни обладают всеми качествами поделочных камней и высоко ценятся художниками и ювелирами. Промышленные запасы тигрового и соколиного глаза имеются в Южной Африке. В нашей стране прекрасные образцы тигрового глаза встречаются в железистых кварцитах Криворожья. Заметим, что как тигровый глаз, так и соколиный глаз — природные смеси, и считать их отдельными минералами было бы ошибочно.

## Округлые агрегаты

А как образуются радиально-лучистые агрегаты (рис. 52)? В принципе — так же, как и параллельно-шестовые агрегаты первого типа, с той разницей, что индивиды нарастают не на плоскую подложку, а на замкнутую выпуклую поверхность песчинки, крупинки породы, кристаллика. Если рост идет в трещине или в пленке раствора, получается плоский агрегат — «солнце». В центральной части радиально-лучистого агрегата имеется зона геометрического отбора. Иногда такой агрегат напоминает сферолит. Но сферолиты, как известно, — это не агрегаты, а сложные индивиды — расщепленные кристаллы.

Если радиально-лучистые агрегаты близки к параллельно-шестоватым агрегатам первого типа, то конкреции (рис. 53, а) сродни третьему типу. В конкреции индивиды расположены тоже по радиусам, как и в радиально-лучистом сростке. Пространство для роста освобождается кристаллизационным дав-



**Рис. 52. Радиально-лучистые агрегаты астрофиллита. Хибинь**

лением. Такие агрегаты растут в рыхлых, податливых средах — глинах, песках и др.

При росте оолитов и пизолитов песчинка или другое постороннее тело обволакивается слоями минерала, и получается округлое образование. К таким агрегатам относится жемчуг. Он состоит из микроскопических индивидов кальцита и арагонита, связанных органическим веществом. Цементируясь друг с другом, оолиты образуют сложные агрегаты (рис. 53, б). Из оолитовых агрегатов состоят боксит (смесь гидроокислов алюминия и железа), некоторые железные руды, отложения кальцита и арагонита из вод некоторых минерализованных источников.

В секрциях (рис. 53, в) отложение минерального вещества происходит на стенках замкнутой полости. В противоположность конкрециям, рост агрегата идет от периферии к центру. Небольшие секрции с плотной оболочкой называются *жеодами*.

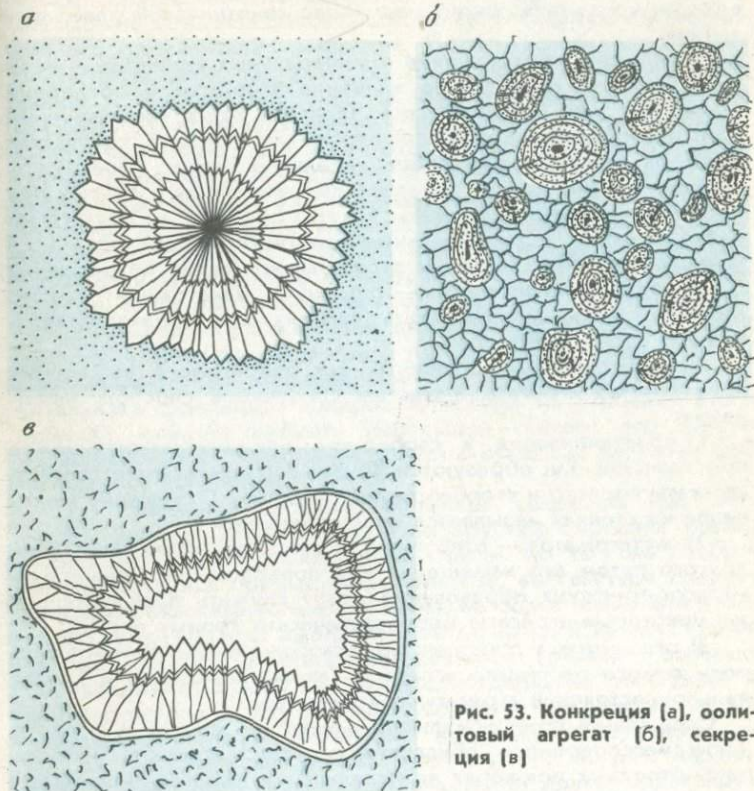


Рис. 53. Конкреция [а], оолитовый агрегат [б], секреция [в]

## КАК ПОДОБРАТЬ КЛЮЧ К ПРОБЛЕМЕ

Как же минералог подбирает ключи к агрегатам, как заставляет их рассказать свою «биографию»? Научиться этому — значит получить доступ к важнейшей информации о процессах образования горных пород и месторождений и в конечном счете обогатить арсенал методов поиска полезных ископаемых. Проблема, однако, относится к труднейшим в минералогии. Решение ее осложняется и колоссальным, малоизученным многообразием агрегатов; по словам одного из ведущих минералогов-онтогенистов А. Г. Жабина, «накопленная информация о строении минеральных агрегатов земной коры производит впечатление неограниченного разнообразия, которое

едва ли когда-либо будет подчинено генетической классификации».

Фундаментальное учение о минеральных агрегатах — дело будущего. Но пристальное изучение агрегатов в последние 20—25 лет уже принесло свои плоды: в море «неограниченного разнообразия» возникли отдельные островки, где исследователь чувствует под собой надежную опору. Такими островками служат друзы, параллельно-шестоватые и другие уже рассмотренные нами агрегаты. На этих простых, но достаточно разнообразных и поучительных приметах минералог учится правильно ставить задачу и отрабатывает метод ее решения.

Исходная информация — строение, «анатомия» самого агрегата. Цель — восстановить картину его происхождения. Что для этого требуется?

Прежде всего — установить, как заполнялось веществом пространство агрегата. Известны следующие способы заполнения:

1) кристаллизация в свободном или освобождающемся пространстве. Так образуются друзы, параллельно-шестоватые агрегаты первого и второго типов, секреции. Отложение минералов на стенках называется крустификацией;

2) метасоматоз — отложение одного вещества на месте другого путем его замещения или превращения. Примерами метасоматических образований могут служить псевдоморфозы, некоторые агрегаты метаморфических горных пород;

3) отложение в пространстве, освобождаемом при активной роли самого растущего агрегата. Таковы конкреции и параллельно-шестоватые агрегаты третьего типа.

Следующий принципиальный момент — способ и особенности массопереноса, обусловившего рост агрегата. Во всех рассмотренных примерах кристаллизация происходила в водных растворах, а вещество доставлялось к растущему агрегату посредством диффузии (во всех случаях), течения раствора, конвекции и концентрационных потоков (друзы), капиллярных явлений (параллельно-шестоватые агрегаты второго и третьего типов, конкреции). В соответствии с универсальным принципом Кюри, симметрия массопереноса отражается в строении минерального агрегата. Вопрос этот довольно сложен, и следует остановиться на нем подробнее.

Реконструируя историю минерального агрегата, минералог чаще всего интересуется не столько его внешней формой, сколько симметрией его текстуры и структуры. В данном случае термин «симметрия» следует понимать более широко. Под симметрией текстуры подразумевают повторяемость типичных, примерно одинаковых деталей строения в соответственных точках всего пространства агрегата. Симметрия структуры — это закономерности строения в пределах отдельного представительного, характерного фрагмента. Возьмем для примера конкрецию. Если она растет в однородной

среде, пропитанной неподвижным раствором, то массоперенос может осуществляться лишь за счет диффузии и капиллярного просачивания жидкости. Такой массоперенос имеет симметрию шара, так как идет равномерно во всех направлениях и участках пространства. Внешняя форма конкреции (см. рис. 53, а) приближается к шаровой. Текстура ее также имеет симметрию шара: в соответственных точках — в данном случае на одинаковых расстояниях от поверхности агрегата — повторяются примерно одинаковые элементы. Они могут быть получены друг из друга, включая размеры и характер ориентировки, с помощью операций симметрии, возможных для шара. Если же изучение конкреции показывает, что симметрия ее текстуры отклоняется от шаровой, то необходимо сделать вывод, что и в питании имели место соответствующие отклонения: окружающая среда не была вполне однородной; массоперенос был направленным и т. д. В качестве представительного фрагмента конкреции, исходя из строения этого агрегата, следует выбрать небольшой сектор; его можно характеризовать симметрией конуса с осью  $L_{\infty}$ , направленной по радиусу конкреции.

Для сравнения рассмотрим теперь секрецию (см. рис. 53, в). Вариант первый: секреция крустифицирована равномерно по всей внутренней поверхности. По тем же соображениям, что и в предыдущем примере, ее текстуре следует приписать симметрию шара. Совсем не обязательно при этом, чтобы сама секреция имела шаровую форму. В данном случае внешняя форма агрегата определяется готовой полостью, образование которой — вопрос отдельный, имеющий к формированию агрегата лишь косвенное отношение. А вот неравномерности распределения индивидов в секреции, напротив, весьма существенны. Поэтому рассмотрим вариант второй: одна часть секреции отличается от другой характером индивидов или их размерами, взаимным расположением, толщиной слоя минерала на стенке. Такая текстура имеет симметрию конуса, стрелы и т. д., но не шара. В отличие от предыдущей эта текстура свидетельствует о направленности массопереноса. Представительным фрагментом может служить сегмент — участок секреции с отложившейся в нем друзой, параллельно-шестоватой или иной коркой. В том и другом вариантах строение сегмента имеет симметрию конуса. Симметрия структуры — это в сущности симметрия текстуры более простого агрегата, слагающего участок секреции.

Таким образом, текстура и структура — это дальний и ближний порядки в строении агрегата, обусловленные особенностями его образования.

Наконец, требуется установить организационную иерархию данного минерального коллектива. Только что мы видели простой агрегат (друзу) в роли строительного элемента более сложного агрегата (секреции). Роль составных элементов

могут играть и сложные индивиды — сферолиты и сферокристаллы. Вырастая на общей подложке, они могут вступать в геометрический отбор, срастаться в друзовые и параллельно-шестоватые агрегаты. Возникает несколько уровней организации минерального вещества (хотя в конечном счете любой агрегат построен из индивидов в тесном смысле слова).

А теперь новые примеры.

## Полости — инкубаторы кристаллов

Минерализованная полость — для собирателя сущий клад: отличные кристаллы, друзы, сростки — словом, все лучшее, что можно видеть в коллекциях и музейных витринах, происходит главным образом из полостей в горных породах, рудных телах и жилах (рис. 54). Занорыши, гнезда, продушины — эти их образные и звучные названия, ведущие свое происхождение от старательского фольклора, до сих пор сохраняются в лексиконе горняка (и минералога) наряду с научными терминами — камера, миарола, миндалина.

Среди всего этого минералогического великолепия особо выделяются трещины в некоторых метаморфических горных породах, или, как их еще называют, «жилы альпийского типа». Известны они, впрочем, не только в Альпах, но и во многих других районах земли, в том числе у нас на Памире, Приполярном Урале. В таких трещинах встречаются прекрасные кристаллы и друзы апатита, аксинита, гематита, рутила, брукита, анатаза, эпидота, титанита, альбита. Главное их богатство — высококачественное пьезокварцевое сырье, горный хрусталь.

Как образуются кристаллы и друзы в трещинах «альпийского» типа? Чем обусловлено их высокое качество?

Характерно, что в этих трещинах обнаруживаются в основном те же минералы, которые отдельными зернами рассеяны во вмещающей породе. Значит, из породы эти минералы выносились растворами, а в полости-трещине кристаллизовались вновь. Минералы совершали свой долгий и трудный путь как будто специально для того, чтобы перевоплотиться в музейные шедевры.

На самом деле природе нет никакого дела до наших эстетических эмоций. Главное — это обеспечение энергетического минимума, условия равновесия. Но переотложение вещества с укрупнением индивидов как раз и отвечает этой цели: сокращается суммарная поверхность индивидов, а следовательно, и их общая поверхностная энергия. Все необходимые условия как будто налицо: имеется полость-кристаллизатор — трещина, имеется и «транспортный агент» — влага, пропитывающая горную породу и циркулирующая по ее порам. Правда, круговорот воды между породой и по-

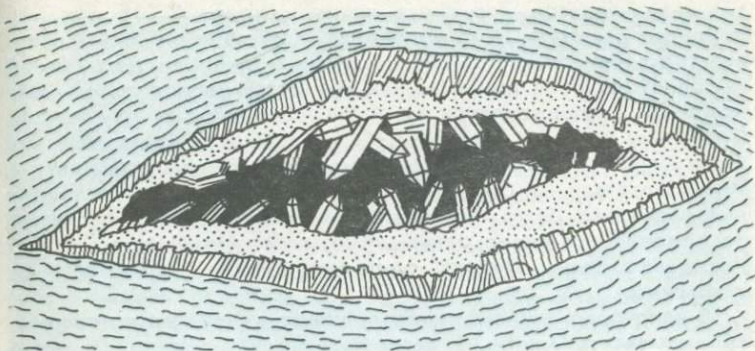


Рис. 54. Минерализованная полость в горной породе

лостью совершается очень медленно. Но если дело касается качества, природа не допускает спешки.

Требуется, однако, еще одно: разная растворимость минералов в породе и в полости. Иначе один и тот же раствор не был бы в состоянии выполнять в одном месте функцию растворителя, а в другом — кристаллообразующей среды. Но возможно ли такое? Оказывается, возможно.

Теория утверждает (а эксперимент удостоверяет), что растворимость индивидов зависит от их величины: при одинаковых условиях мелкие крупинки и зерна растворяются чуть лучше крупных. Поэтому при определенной концентрации раствор по отношению к мелким индивидам будет недосыщен, а по отношению к крупным — пересыщен. В таком растворе мелкие индивиды растворяются, а крупные — растут.

Режим растворения — кристаллизации устанавливается автоматически. В порах породы раствор частично растворяет зерна, пока не станет насыщенным. Попав в полость, он оказывается по отношению к находящимся там кристаллам пересыщенным и отдает им часть растворенного вещества: идет кристаллизация. «Отработавший» раствор, поступая в поры, оказывается по отношению к зернам недосыщенным: идет растворение. И так далее. Раствор исправно выполняет свою роль *транспортного агента*, с *переформированием* в более крупные индивиды вещество освобождается от части поверхностной энергии. Полость как бы осуществляет функцию энергетического дренажа.

Переотложение минералов связано также с тем, что зерна находятся под направленным давлением вышележащих толщ горных пород, а в период метаморфизма испытывали сильное одностороннее сжатие. Установлено, что в точках приложения повышенного давления растворимость кристаллических

тел увеличивается. Это также является причиной обогащения порового раствора. Но в полости кристаллы испытывают лишь всестороннее сжатие: жидкость, в которую они погружены, передает внешнее давление как гидростатическое, и оно равномерно распределяется по всей поверхности кристаллов. Поскольку причины повышения растворимости здесь нет, тот же раствор оказывается пересыщенным, и избыток вещества «сбрасывается» на растущие кристаллы. Частичное растворение несколько разгружает наиболее сжатые точки, давление распределяется более равномерно, соответствующая энергия покидает систему. Полость опять-таки служит энергетическим дренажем.

В некоторых случаях переотложение минерального вещества вызывается местным нагревом. Вблизи источника тепла кристаллы растворяются, а в менее нагретой части вновь выпадают из остывшего раствора. Такого рода полости называются погребями. Источником тепла обычно служит остывающая магматическая интрузия; массоперенос осуществляется путем конвекции.

Метод температурного перепада используется в промышленных масштабах для так называемого гидротермального синтеза кристаллов веществ, растворимость которых повышается при нагревании. Выращивание кристаллов ведется в автоклавах — герметических сосудах, рассчитанных на высокие давления и температуры. В донной части автоклава помещают куски кристаллизующего вещества, в верхней — кристаллические затравки. Температура в нижней части автоклава поддерживается несколько более высокой, чем в верхней. Внизу перегретый раствор насыщается веществом, переносится конвекцией в зону роста, вследствие понижения температуры становится пересыщенным и сбрасывает избыток вещества на затравки. Так получают высококачественные искусственные кристаллы кварца и многих других технических и ювелирных материалов.

Остается ответить на второй вопрос: почему именно в трещинах «альпийского» типа образуется первосортный друзовый материал? Для этого надо разобраться, что требуется для образования хороших друз минералов.

Совершенные кристаллы, как известно, получают при медленном росте в слабо пересыщенных растворах. В этом также предпосылка продолжительного друзового роста: при слабых пересыщениях возникает мало зародышей, и кристаллы имеют возможность дорасти до значительных размеров раньше, чем начнут мешать друг другу. При высоких пересыщениях появление множества центров кристаллизации ведет к тому, что коллективный рост быстро переходит в стадию геометрического отбора, и растущая друза вскоре вырождается в параллельно-шестоватый агрегат.

Рассмотренный нами процесс переотложения минералов идет за счет очень небольшой разницы в условиях растворения и кристаллизации. Температурные перепады невелики;

направленное давление лишь немного повышает растворимость; мелкие индивиды растворяются чуть лучше крупных. Возможность высоких пересыщений в таких условиях исключена. Допустим, по какой-либо причине концентрация раствора все же повысилась; тогда растворение немедленно прекратится и кристаллизующееся вещество будет выделяться до тех пор, пока концентрация не снизится вновь. Диффузия растворенного вещества и циркуляция в порах идут очень медленно, вследствие чего раствор, поступающий в полость, постоянно разбавляется там обедненным раствором. По всем этим причинам пересыщение всегда поддерживается вблизи того нижнего предела, при котором еще возможен рост кристаллов. Но в этом, как мы только что выяснили, и состоит условие образования крупных друз совершенных кристаллов. Рост идет медленно, и надо полагать, что над такими шедеврами природе приходится трудиться особенно долго.

## Агаты и кремни

На территории Подмосковья некогда высились грандиозные горы, вроде нынешних Альп... Но это было невообразимо давно. Уже более миллиарда лет назад на месте подвижной горной области завершилось формирование мощной и жесткой Русской платформы, а на ее поверхности возникла Московская синеклиза — гигантское, очень плоское овальное «блюдо». В течение сотен миллионов лет синеклиза заполнялась осадками, и постепенно они спрессовывались в горные породы. Громадная платформа лишь чуть «вздрагивала» от толчков соседних активных областей: временами блюдо слегка наклонялось то одним, то другим краем, дно его то прогибалось, то снова немного поднималось. Но и этих небольших движений, длившихся миллионы лет, было достаточно, чтобы сюда много раз приходило и вновь отступало море; субтропические, тундровые, пустынные пейзажи сменяли друг друга вместе со сменой геологических периодов и эпох.

Под нынешними равнинными лесами и полями Подмосковья лежат пласты песков и глин, а дальше, до глубины полторы—две тысячи метров, — толщи известняков и доломитов. Так что горные породы Подмосковья не отличаются большим разнообразием и по богатству минералами не могут соперничать, скажем, с Уралом или Забайкальем.

Но в одном нельзя не отдать должного щедрости подмосковной природы: кремни, агаты, халцедоны — богатейшие минералогические клады Подмосковья. Все эти камни — агрегаты одного минерала — кварца. Но их происхождение, строение и свойства существенно различны.

*Кремни известны с глубокой древности: первобытному человеку они служили непревзойденным материалом для*

каменных орудий. Подмосковье было бы для него бесценной кладовой жизненно важного сырья... Но с тех пор как человечество перешло к использованию других материалов, интерес к кремням увял, и изучены они недостаточно. Предполагается, что они образовались после того как известковый морской осадок уплотнился и превратился в горную породу. Кремни относят к метасоматитам: они возникли путем постепенного замещения известняка под действием растворов, несущих связанный кремнезем (диоксид кремния), вероятно, в виде легко растворимых силикатов щелочных металлов. Источником кремнезема служили продукты выветривания силикатных пород суши и захороненные в известняке кремневые остовы некоторых организмов, населявших море. Кремнезем выделялся из раствора и оставался на месте, а взамен поступало в раствор и уносилось соответствующее количество минералов известняка. На месте выделения кремнезема постепенно образовывался округлый кремневый желвак. В этом проявлялась все та же тенденция к концентрации вещества, стимулируемая сокращением поверхностной энергии. Как и в предыдущем примере, она осуществлялась при посредничестве вездесущего транспортного агента — воды. Рассеянное в большом объеме вещество как бы стягивалось в одно место; недаром кремни называют еще стяжениями.

Построены кремни из скоплений сферолитов халцедона и микроскопических зерен кварца. Они всегда содержат много примесей: частички окислов и фосфатов железа, пирита, кальцита, мелкие фрагменты материнской породы, окаменевшие остатки древней фауны. Иногда в кремнях заключены небольшие полости с агатами или друзами кристаллов кварца. Снаружи они часто покрыты беловатой корочкой — так называемой патиной.

В полированных срезах красота подмосковных кремней предстает палитрой ярких разноцветных пятен (рис. 55). В синие и голубые цвета кремни окрашены частичками вивианита и окисленного пирита; окислы железа пигментируют их бесчисленными бурыми, красными, желтыми оттенками. На разрезанном кремне часто виден концентрический узор. Это — результат ритмической диффузии, явления, открытого в конце прошлого века немецким химиком Р. Лизегангом. Снаружи в кремень диффундировало вещество, способное вызывать образование окрашенного осадка. Это могла быть, например, просто вода, обогащенная кислородом, окислявшая пирит и вивианит с выпадением бурого гидрооксида железа. Когда концентрация диффундирующего вещества достигала определенного уровня, происходила реакция с выпадением осадка, в результате чего концентрация вновь падала и стимулировалась дальнейшая диффузия вглубь до нового накопления вещества и выпадения осадка. Для подмосковных кремней «кольца Лизеганга» очень характерны.



Рис. 55. Кремни Подмосковья (полированные срезы из коллекции Т. П. и Ю. И. Рапопортов). Окрестности г. Дмитрова

Агаты встречаются в Подмосковье гораздо реже кремней. Наиболее известны красивые пестроцветные и бурые агаты из окрестностей г. Голутвина (рис. 56) и голубовато-серые агаты из-под г. Ступино. По своему строению агаты Подмосковья резко отличаются от кремней, в то же время повторяя в основных чертах классические агаты из вулканических пород. Обычно агатовая жеода заполнена сменяющими друг друга резко разграниченными замкнутыми концентрическими слоями халцедона. Ориентировка сферолитов халцедона упорядочена: в микроскоп можно разглядеть, что их центры роста располагаются на поверхности предыдущего слоя, а направлениями роста сферолиты ориентированы внутрь полости. В середине чаще всего находится незаполненное пространство, ограниченное внутренним слоем халцедона или наростами на него кристаллами кварца. Агат, стало быть, представляет собой сложный агрегат с несколькими уровнями структурной организации: кристаллические волокна — сферолиты — друзы сферолитов (слои) — агат. В минералогическом смысле агаты гораздо «чище» кремней, хотя и в них встречаются включения посторонних минералов.

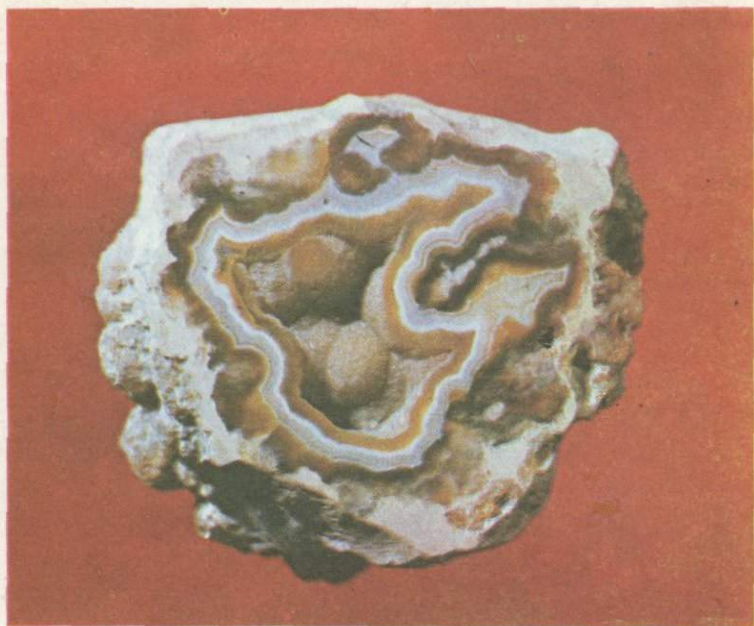


Рис. 56. Агат [коллекция Т. П. и Ю. И. Рапопоров]. Приокское месторождение, Московская область

Не вызывает сомнения, что, в отличие от кремней, агаты образовались при заполнении готовых полостей. В вулканических породах полости возникли при образовании газовых пузырей в жидкой лаве; известны агаты в полостях, оставшихся после выгорания затопленных лавой деревьев. В известняках полости образовались главным образом при выщелачивании подземными водами. Относительно же способа заполнения полости агатом высказывались различные точки зрения, между сторонниками которых шла многолетняя полемика, дававшая повод новым исследованиям. Дискуссия о происхождении агатов интересна и поучительна.

Еще в первой половине прошлого столетия возникло представление, что агаты образуются послойным отложением халцедона из раствора, поступающего в полость извне. В 1915 г. Р. Лизеганг выступил с совершенно иной точкой зрения: происхождение агатов он связывал с ритмической диффузией. По мнению Лизеганга, полость сначала заполнялась коллоидным сгустком — гелем кремнезема. Гель состоит из микроскопических, не более  $10^{-5}$  см, частичек кремнезема, слабо связанных между собой и погруженных в

водную среду. Затем из стенок полости начинали просачиваться и диффундировать в гель другие вещества, вызывавшие образование в нем «колец Лизеганга», вследствие чего гель окрашивался и разделялся на концентрические слои. На заключительном этапе гель кристаллизовался в халцедон, наследовавший от него концентрически-слоистое строение. В подтверждение своей гипотезы Лизеганг ссылался на интересные и эффектные опыты с искусственными веществами.

Взгляды Лизеганга получили распространение среди геологов. Но в 1934 г. известный советский минералог П. П. Пилипенко, опираясь на обширный природный материал, выступил с критикой коллоидно-диффузионной гипотезы. Он указал, в частности, что ритмическая диффузия вызывает образование размытых полос, тогда как в агатах слои разграничены резко. Упорядоченное строение агатов говорит об определенной последовательности кристаллизации. Поскольку центры сферолитов расположены на поверхности смежного слоя, необходимо заключить, что этот слой кристаллизовался раньше. Отсюда следует, что кристаллизация шла слой за слоем по направлению от стенок полости к центру. Гель же кристаллизовался бы одновременно во всем объеме. При этом от него отделилась бы вода, вследствие чего объем должен был сократиться, и в полости неизбежно остались бы пустоты. Между тем, вполне обычны агаты и без пустот. С другой стороны, неясно, куда могла бы деваться масса геля при образовании тонкостенной жеоды, в которой тонкий слой халцедона на стенках занимает лишь малую часть всего объема?

Таким образом, коллоидно-диффузионная гипотеза внутренне противоречива и расходится с наблюдаемыми фактами. Казалось, после работ П. П. Пилипенко должна была окончательно восторжествовать идея образования агатов по типу секреций — путем последовательного, от периферии к центру, отложения халцедона из обновлявшегося раствора. Но к середине нынешнего столетия коллоидная гипотеза приобрела новых сторонников в связи с другой, гораздо более важной для практики проблемой.

Еще в предвоенные годы наметился кризис в представлениях о гидротермальных рудных месторождениях. Известно, что главные компоненты руд цветных металлов — сульфидные минералы. Но в какой форме рудное вещество доставляется к месту своего отложения? Возможность переноса в истинных растворах приходилось отвергать, так как растворимость сульфидов столь низка, что для образования даже небольшой залежи потребовалось бы чуть ли не целое Средиземное море раствора. Такому количеству воды просто неоткуда взяться. Противоречие как будто устранялось, если допустить перенос рудных минералов в виде коллоидных растворов, концентрации которых могут быть во много раз

выше. Тогда рудное вещество сначала отлагалось бы в виде геля, который впоследствии раскристаллизовывался.

Теория гидротермального рудообразования — важнейшая глава учения о месторождениях полезных ископаемых. В решении таких крупных проблем ученым не раз помогало изучение всякого рода аналогий. И минералоги, занимавшиеся признаками отложения руд из коллоидных растворов, стали пристально интересоваться другими образованиями, облик которых наводил на мысль о коллоидном происхождении. Возникло предположение, что участием коллоидов обусловлена специфическая почковидная форма некоторых минеральных агрегатов; их стали называть «колломорфными». К ним относили, в частности, «стеклянные головы» — красную (гематит), бурую (гётит), зеленую (малахит) и др. Все эти агрегаты состоят из слоев сферолитов и имеют гладкую почковидную внешнюю поверхность (рис. 57). К «колломорфным» причислялись также агатовые и халцедоновые агрегаты в жеодах, имеющие аналогичное строение. Все они служили как бы моделями коллоидного минералообразования в рудных жилах.

Многие минералоги, однако, придерживались прежней точки зрения, связывая образование этих агрегатов с кристаллизацией непосредственно из растворов, а не из коллоидных систем. По их мнению, связь «колломорфных» агрегатов с гелями ограничена внешним сходством. Вопрос о гелевом или кристаллизационном происхождении агатов как удобных для изучения аналогов «колломорфных» рудных агрегатов приобрел принципиальное значение.

В 1970 г. минералог В. И. Степанов на примере подмосковных халцедонов показал несостоятельность гипотезы гелевого происхождения «колломорфных» агрегатов. Высокая вязкость геля препятствовала бы оседанию кристаллических зародышей на подложку. Вследствие этого кристаллизация не ограничивалась бы одним «фронтом», а неизбежно распространилась бы на всю массу геля, так как в нем имеется сколько угодно затравок в виде коллоидных частиц. Поэтому при раскристаллизации геля не могла бы образоваться упорядоченная сферолитовая корка, а получился бы зернистый агрегат с более или менее равномерно распределенными в пространстве индивидами. Так всегда происходит кристаллизация вязких жидкостей, например «засахаривание» сиропов и меда: получается однородная масса, а не отдельные слои или осадок. В более общей форме на то же самое указывает универсальный принцип Кюри. При раскристаллизации геля массоперенос мог бы осуществляться только способом диффузии и имел бы поэтому симметрию шара. Структура же агата или халцедоновой жеоды имеет симметрию конуса, указывающую на действие сил иного характера. В данном случае это были силы адсорбции, вызывавшие появление

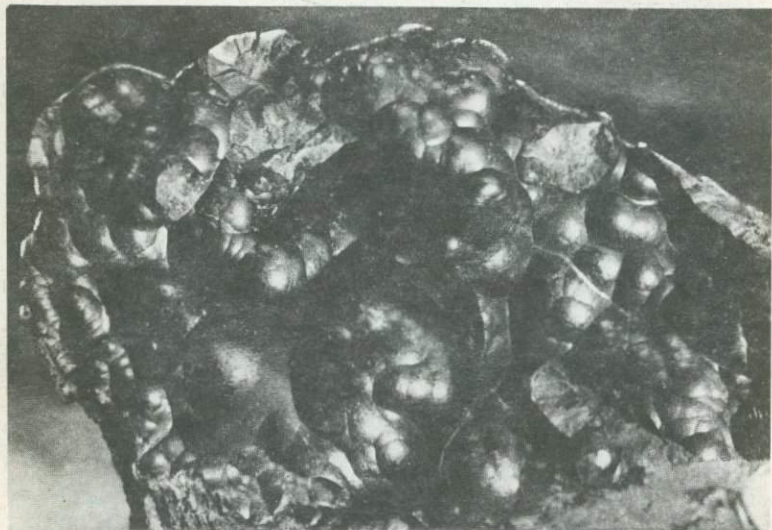


Рис. 57. «Бурая стеклянная голова» — агрегат сферолитов гётита. Бакальское месторождение, Южный Урал

центров роста на стенках, а затем и на сформированной корке. Они были направлены по нормальям к стенкам жеоды и имели симметрию конуса.

Что касается проблемы переноса рудного вещества, то ее решение впоследствии пошло в основном другими путями. Ныне большинство исследователей придерживается мнения, что рудное вещество переносится в виде растворимых соединений, из которых сульфиды образуются уже на месте отложения в результате химической реакции. Согласно последним данным, в таких активных средах, как гидротермальные растворы, и сами сульфиды растворяются в ощутимой степени. В каком виде выпадает вещество из раствора — в виде кристаллов или сферолитов, — зависит от обстоятельств.

В дискуссии о «коллоидных» агрегатах обсуждался еще один интересный для нас вопрос — о так называемых «натечных формах». Натечными называют агрегаты, возникающие при течении минералообразующей жидкости по подложке, на которой минерал выделяется по мере течения. Примерно так представлялось и осаждение геля кремнезема, результатом которого явилось образование полых жеоды «коллоидного» халцедона. И хотя гипотеза коллоидного происхождения агатовых и халцедоновых жеод оказалась ошибочной, выражение «натечные формы» по привычке все еще употребляется применительно к халцедоновым коркам, обра-

зовавшимся в жеодах. Подразумевается, что они возникли при стекании раствора по стенкам жеоды.

Универсальный принцип Кюри и на этот раз поможет нам прояснить картину. Поток жидкости, стекающей по стенке, очевидно, имеет симметрию стрелы или листка (Р). Согласно принципу Кюри, этим должна ограничиваться симметрия текстуры образующейся корки, если бы она действительно была натечной. Отдельные слои и вся корка в целом выклинивались бы в одном — вертикальном — направлении, в соответствии с ориентировкой силы тяжести, вызывающей стекание. Но в действительности ничего подобного нет: толщина корки везде одинакова, и текстуре жеоды, как уже отмечалось, свойственна симметрия шара. Следовательно, сила тяжести в данном случае не играла решающей роли. Доказательство «от противного» привело нас к тому, что версия натечного происхождения наших халцедонов должна быть признана ошибочной, как противоречащая принципу Кюри. Заметим, что существуют и другие веские доводы против натечного образования халцедоновых корок.

Обсуждение этих агрегатов мы закончим воображаемой экскурсией в один из живописных уголков Подмосковья, где познакомимся с еще одним любопытным природным феноменом.

## Загадка халцедоновых сосулук

Лесистые овраги в окрестностях подмосковного города Ступино — с давних пор место паломничества любителей камня. После многолетних раскопок овраги основательно оскудели, но когда-то здесь можно было без большого труда собрать буроватые халцедоны и голубовато-серые агаты, в изобилии встречавшиеся в осыпях и коренных выходах известняковых пород. Необычайно красивые и крупные, до 25—30 см, халцедоновые жеоды сделали бы честь любому минералогическому музею. Но более всего поражали выросшие на стенках и сводах некоторых жеод длинные, в 15 см и больше, причудливо изогнутые и разветвленные халцедоновые «сосульки» (рис. 58). Все это напоминало замысловатые восковые изваяния, но на самом деле халцедон очень тверд — он легко царапает стекло.

Своеобразный внешний вид — всегда свидетельство необычного «жизненного пути» минерала. Справедливости ради надо заметить, что предмет нашего интереса для минералогов не новость: халцедоновые «сосульки» известны и на других месторождениях. Но по яркости и масштабности этого явления ступинским халцедонам, пожалуй, нет равных.

Еще Р. Лизеганг дал подобным образованиям название «псевдосталактиты». Очевидно, он имел в виду, что «сосульки» внешне похожи на сталактиты пещер. В минералогической

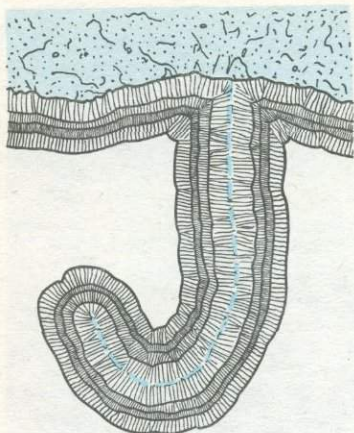


Рис. 58. Халцедоновая жеода с псевдосталактитами. Московская область

литературе псевдосталактиты — излюбленный пример «натечных форм». Однако универсальный принцип Кюри снова ставит все на свои места и убедительно доказывает ошибочность укоренившегося мнения; доводы аналогичны тем, которые приводились выше. Допустим, что раствор действительно стекал с выступов свода полости. Тогда свежий раствор поступал бы к основанию псевдосталактита, и по мере выделения вещества при стекании вниз концентрация должна была уменьшаться. В результате псевдосталактит был бы со стороны основания толще. Возможен другой вариант: выделение минерала шло преимущественно на нижнем конце псевдосталактита, где задерживались капли раствора. В любом случае псевдосталактит имел бы текстуру с симметрией конуса, соответствующей симметрии массопереноса стекающим раствором. Кроме того, рост псевдосталактита в длину происходил бы путем отложения слоев преимущественно на нижнем конце поперек его продольной оси.

На самом деле диаметр псевдосталактита по всей длине не меняется, слои везде имеют примерно одинаковую толщину и расположены концентрически вокруг оси. Иными словами,

Рис. 59. Строение псевдосталактита



текстура псевдосталактита имеет симметрию цилиндра. Каждый слой является продолжением соответствующего слоя халцедоновой стенки жеоды (рис. 59) — значит, на псевдосталактитах и стенках слои нарастали одновременно. Далее: невозможно представить, как и почему могли «натечные» псевдосталактиты разветвляться и изгибаться, иногда на  $180^\circ$ . Встречаются, хотя и редко, «сосульки», выросшие со дна жеоды вверх — совсем уже очевидное противоречие с «натечностью». И, наконец, как в толще известняка могли сохраниться пустые полости, в которые раствор втекал и из которых он вытекал, только смачивая стенки? Если же полость была заполнена раствором, — а так оно, очевидно, и было, — то о каких натёках может идти речь?

В общем, аргументов против натечного происхождения халцедоновых «сосулёк» набирается более чем достаточно. Но в таком случае все «здание» разом рушится, ибо приходится признать, что псевдосталактиты вообще не росли в длину. Они могли образоваться только одним способом — нарастая на готовый остов. И пока этот остов не будет обнаружен, происхождение «сосулёк» останется загадкой.

Вообще говоря, стержневидные халцедоны — не редкость, но обычно роль остова выполняют в них иголки других минералов, выросшие в полости еще до кристаллизации халцедона. В псевдосталактитах никакого постороннего основания обнаружить не удастся.

Похоже, что решение проблемы зашло в тупик. Поэтому сделаем остановку и, вспомнив о пользе моделирования, выполним простенький опыт. Нальем в стакан раствор желтой кровяной соли или разбавленный в несколько раз силикатный канторский клей. Бросим в стакан несколько мелких крупинок медного купороса и начнем наблюдать за ними. Через некоторое время на каждой крупинке появятся тонкие трубчатые

выросты, они будут удлиняться, изгибаться, давать боковые побеги, и со временем в стакане вырастет целый «лес». Перед нами — модель явления, происходившего в полости жеоды до начала кристаллизации халцедона. Далее — комментарий.

Сульфат меди (медный купорос) вступает в обменную реакцию с желтой кровяной солью или силикатом натрия (силикатный клей), и образуется нерастворимое вещество — гексацианоферрат либо силикат меди. В нашем опыте оно выделялось в виде студенистой пленки, обволакивавшей кристаллики медного купороса. Пленка — полупроницаемая мембрана: она пропускает сквозь себя молекулы воды, но задерживает частицы растворенного вещества. В данном случае вода диффундирует преимущественно снаружи внутрь капсулы, в которую заключен кристаллик: здесь находится более концентрированный раствор, а следовательно, концентрация самой воды меньше; диффузия же вещества всегда идет в ту сторону, где его концентрация ниже. Таким образом, мембрана действует, как насос: она «накачивает» воду в капсулу, и там возникает избыточное, так называемое осмотическое давление. Пленка растягивается, кое-где не выдерживает давления и рвется; изнутри раствор сульфата меди устремляется в брешь, струйка соприкасается с внешним раствором и тотчас же обволакивается мембраной. Так появляются трубчатые отростки и побеги, а внутреннее давление заставляет их вытягиваться и изгибаться. Существенно, что реакция всегда идет на контакте реагентов: смешиваться им не позволяет возникающая мембрана.

Нечто подобное происходило и в нашей жеоде. Сначала полость заполнилась раствором кремнезема, вероятнее всего, в виде силикатов щелочных металлов, как в опыте с силикатным клеем. Затем через поры в стенках стали просачиваться растворы солей тяжелых металлов — железа, марганца и др. Надо полагать, это было связано с какими-то изменениями в геохимической обстановке. Эти соли выполняли ту же роль, что медный купорос в нашем опыте, — мы выбрали его просто как более доступное и распространенное вещество. В устьях пор растворы медленно приходили в соприкосновение с заключенной в полости жидкостью вследствие чего стенки покрывались мембранной пленкой. Осмотическое давление отслаивало мембрану от стенок, прорывало ее, и появлялись мембранные трубки с изгибами и ветвями. А поскольку они были несколько тяжелее раствора, сила тяжести вносила свои поправки: трубки, выросшие со свода, свисали вниз, а те, что появились на дне, ложились и сливались с выстилающей полость мембраной. Сохранились лишь немногие из них.

Через какое-то время мембрана отвердела и превратилась в тончайшую подложку. Затем настала очередь халце-



Рис. 60. Псевдосталактиты пирита. Курская магнитная аномалия

дона: его сферолиты слой за слоем обрастали стенки и нити...

Мембраны и осмос играют исключительно важную роль в живых организмах: они управляют процессами обмена веществ, функцией почек и других органов, транспортировкой питания и влаги от корневой системы растения к его надземным частям. Благодаря осмотическому давлению живые ткани сохраняют свою форму, оно поддерживает стебель растения в вертикальном положении, а листья — простертыми к свету и воздуху. Полупроницаемой мембраной снабжена каждая клетка, и общая площадь мембран в одной особи растения или животного может исчисляться гектарами.

Участие этих типично биологических механизмов в жизни минералов кажется необычным: в процессах минералообразования мы привыкли усматривать иные схемы. А ведь ступинский феномен отнюдь ни уникален. Псевдосталактиты халцедона, пусть не столь эффектные, встречались и на Волыни, в агатах Западной Грузии, Сихотэ-Алиня и в других районах. На роль «мембранных ячеек» в образовании некоторых агатов указывал еще Р. Лизеганг. Советский минералог Ф. В. Чухров в 1940 г. описал мембранные формы хризколлы — красивого голубого медного минерала. В мембранных формах встречаются гётит, псиломелан, пирит (рис. 60).

И, может быть, самое удивительное — тот факт, что отдаленное внешнее сходство этих минеральных форм со своеобразной флорой или фауной действительно имеет основой аналогию с некоторыми явлениями, происходящими в живой природе.

Если вам, читатель, случится найти минералы с «сосульками», отнесите к ним внимательно. Быть может, они возбудят ваш интерес, наведут на размышления, и судьба этих минералов покажется вам необычной и значительной.

А. Пуанкаре, французский математик и философ, как-то заметил: «Если бы природа не была прекрасна, она не стоила бы того, чтобы ее знать».

Прекрасны и величественны законы формы минералов. За ними угадывается биография камня. Постарайтесь вникнуть в нее — и откроются удивительные хитросплетения мотивов и обстоятельств возникновения минералов, о которых они поведают сами, если набраться терпения и суметь к ним прислушаться.

Холодный и бездушный камень, оказывается, может не так уж мало. Он выбирает экономный способ структурной перестройки; он сам себя лечит; изменяя внешний облик, приспособляется к условиям своего развития. Даже отбор, самоорганизация и объединение усилий, пусть в примитивной форме, доступны сообществу минералов. А «несовершенства» кристалла — вовсе не неудача природы: таким способом она непринужденно выходит из трудного положения.

Наше повествование подошло к концу. Вероятно, не на все свои вопросы любознательный читатель получил исчерпывающий ответ, и не всегда такой ответ существует. Но если у читателя возник вкус к тому, что Н. И. Кокшаров хорошо назвал «беседовать с минералами», то остальное довершат любовь к природе и жажда ее познания. И цель автора была бы в таком случае достигнута.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Банн Ч. Кристаллы, их роль в природе и науке. М., Мир, 1970.
- Гегузин Я. Е. Живой кристалл. М., Наука, 1981.
- Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Изд-во Львовского университета, 1961.
- Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Индивиды. М., Наука, 1975.
- Жабин А. Г. Жизнь минералов. М., Советская Россия, 1976.
- Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Агрегаты. М., Наука, 1979.
- Леммлейн Г. Г. Морфология и генезис кристаллов. М., Наука, 1973.
- Попов Г. М., Шафрановский И. И. Кристаллография. М., Высшая школа, 1972.
- Хёрлбат К., Клейн К. Минералогия по системе Дэна. М., Недра, 1982.
- Шаскольская М. П. Кристаллография. М., Высшая школа, 1976.
- Шаскольская М. П. Кристаллы. М., Наука, 1978.
- Шаскольская М. П. Очерки о свойствах кристаллов. М., Наука, 1978.
- Шафрановский И. И. Симметрия в природе. Л., Недра, 1968.
- Шафрановский И. И. Очерки по минералогической кристаллографии. Л., Недра, 1974.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>О минералах: классы и иерархии . . . . .</b>	<b>4</b>
Азы морфологии . . . . .	6
Кристаллы минералов . . . . .	9
«Кристаллы блещут симметрией» . . . . .	12
Иерархия симметричности . . . . .	19
Многообразие: проблема простого и сложного . . . . .	26
Кристаллографическая символика . . . . .	31
Мини-практикум по кристаллографии . . . . .	33
<b>Диалектика кристаллизации . . . . .</b>	<b>39</b>
Рождение кристаллов . . . . .	41
Кристаллы младшего и старшего возраста . . . . .	53
Кристаллы исчезают . . . . .	67
Парад индивидов . . . . .	69
Резюме о минеральных индивидах . . . . .	83
<b>Родственники, семьи, близнецы . . . . .</b>	<b>85</b>
Симбиоз индивидов . . . . .	85
Индивид расщепляется . . . . .	97
<b>Этюды об агрегатах . . . . .</b>	<b>105</b>
Минеральные агрегаты . . . . .	105
Как подобрать ключ к проблеме . . . . .	115
Список рекомендуемой литературы . . . . .	134

Борис Зиновьевич Кантор

**МИНЕРАЛ РАССКАЗЫВАЕТ О СЕБЕ**

Редактор издательства А. М. Антокольская  
Оформление художника Ю. А. Ноздрина  
Художественный редактор Е. Л. Юрковская  
График-иллюстратор А. В. Бушуев  
Технические редакторы Н. В. Жидкова,  
Л. А. Мурашова  
Корректор И. Н. Таранева  
ИБ № 6247

Сдано в набор 20.11.84. Подписано в печать  
10.06.85. Т-10975. Формат 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага  
офсетная № 1. Гарнитура «Журнально-руб-  
леная». Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,14.  
Усл. кр.-отт. 22,26. Уч.-изд. л. 8,76. Тираж  
100 000 экз. Заказ 883/509—2. Цена 40 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,  
103633 Москва, К-12, Третьяковский проезд,  
1/19.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграф-  
прома при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной  
торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

103  
—  
|

4663

"МИР ПОЛОН  
УДИВИТЕЛЬНОЙ  
КРАСОТЫ  
И БЛАГОРОДСТВА,  
КОТОРЫЕ  
ВЫ ДОЛЖНЫ ОТКРЫТЬ  
ПРЕЖДЕ ВСЕГО САМИ.  
НУЖНО УЧИТЬСЯ  
ВИДЕТЬ И СЛЫШАТЬ,  
ГОТОВИТЬСЯ  
К ВСТРЕЧЕ С ЧУДОМ."

академик  
А.Н. Колмогоров



НЕДРА