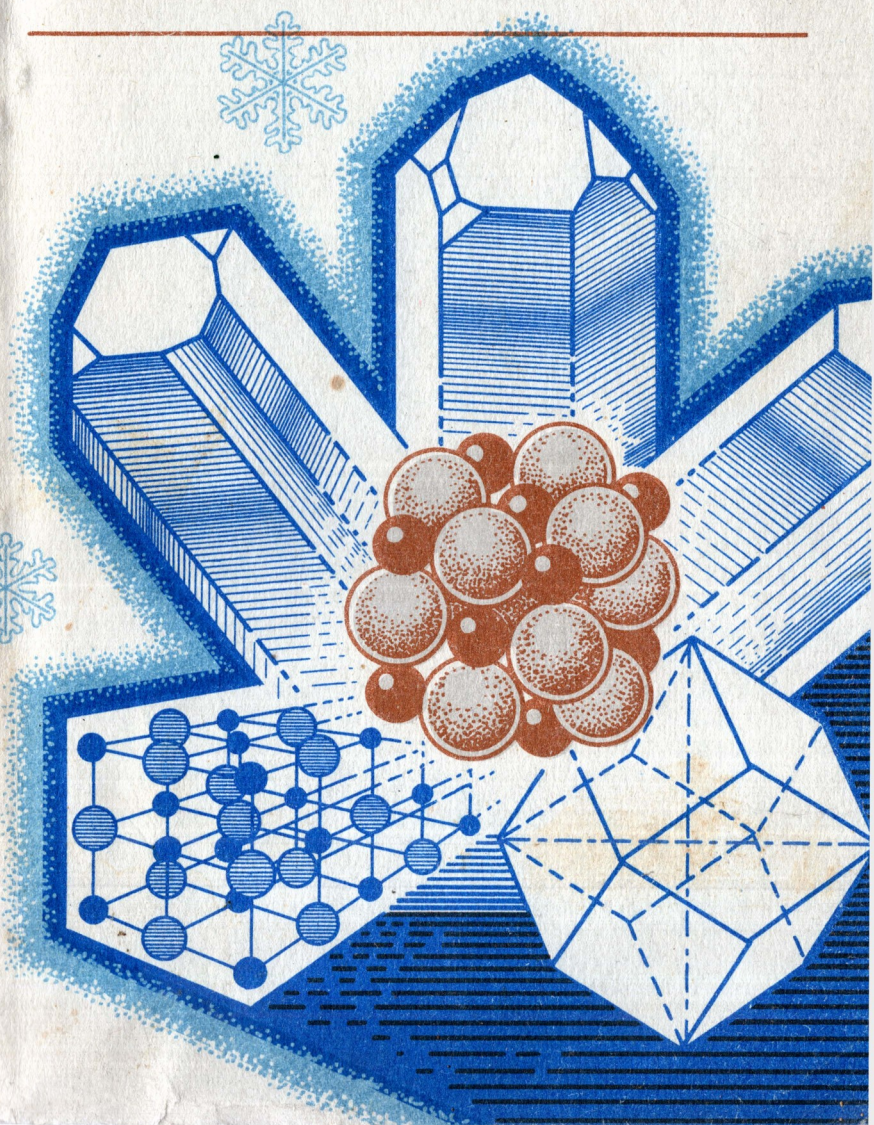




*М. П. Масковская*

# КРИСТАЛЛЫ



*М. П. Шакольская*

# КРИСТАЛЛЫ

---

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ  
ИСПРАВЛЕННОЕ



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1985



22.37

III 27

УДК 548.5

**Шаскольская М. П.**

III 27

**Кристаллы.**— 2-е изд., испр.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.—208 с.

В книге в простой и занимательной форме рассказывается о росте кристаллов в природе (под землей, в глубинах морей, в пещерах, в минеральных месторождениях, в облаках) и о выращивании кристаллов в лабораториях и на заводах. Рассказывается о том, как создавались кристаллы, не существовавшие в природе, как человек применяет кристаллы в различных областях техники. Книга иллюстрирована оригинальными рисунками и примерами из художественной литературы.

Для учащихся общеобразовательной и профессиональной школы; много пользы для себя могут извлечь из нее студенты и преподаватели вузов, а также специалисты.

Ш 1704010000—068 126-85  
053 (02)-85

ББК 22.37  
531.9

*Марианча Петровна Шаскольская*

**КРИСТАЛЛЫ**

Редактор *Д. А. Миртова*

Техн. редактор *И. Ш. Аксельрод*

Корректоры *З. В. Антонова, Е. Я. Стрובה*

ИБ № 12699

Печать с матриц. Подписано к печати 20.03.85. Т-07726. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,92. Усл. кр.-отт. 11,13. Уч.-изд. л. 10,1. Тираж 83 000 экз. Заказ № 1186. Цена 35 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы

117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 198052 Ленинград Л-52, Измайловский проспект, 29

Отпечатано в типографии № 2 изд-ва «Наука» 121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6

© Издательство «Наука».

Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1978

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	5
<b>Глава 1. Мир кристаллов . . . . .</b>	<b>9</b>
В мире камней . . . . .	9
Формы кристаллов . . . . .	13
Структура кристаллов . . . . .	16
Как исследуют структуру кристаллов . . . . .	23
Некристаллические (аморфные) твердые вещества . . . . .	38
Кристаллы льда и снега . . . . .	41
О драгоценных камнях . . . . .	47
Сказки о кристаллах . . . . .	52
<b>Глава 2. Как растут природные кристаллы . . . . .</b>	<b>58</b>
Земля живет . . . . .	58
Как образуются расплавы . . . . .	62
Как кристаллы растут из расплавов . . . . .	66
Как кристаллизуется магма . . . . .	68
В природных музеях . . . . .	74
О соли, соляных озерах и свойствах растворов . . . . .	85
Как кристаллы растут из растворов . . . . .	89
Кара-Богаз-Гол . . . . .	94
Кристаллы солей под землей . . . . .	97
Кристаллы в пещерах . . . . .	100
Переохлажденные жидкости . . . . .	104
Как кристаллы растут из паров . . . . .	108
Кристаллы в облаках . . . . .	114
Кристаллы и живые организмы . . . . .	116
Включения в кристаллах . . . . .	121
А если кристалл не многогранный? . . . . .	128
А все-таки почему многогранный? . . . . .	133

...И не только многогранники . . . . .	139
Кристаллы во Вселенной . . . . .	147
<b>Глава 3. Как выращивают кристаллы . . . . .</b>	<b>148</b>
Зачем растят кристаллы . . . . .	148
Кристаллизация из растворов . . . . .	149
Фабрики кристаллов . . . . .	155
Кристаллизация из расплавов . . . . .	163
Способ А. В. Степанова . . . . .	173
Как вырастили рубин . . . . .	176
Как выращивают кварц . . . . .	184
Как растут алмазы . . . . .	194
Приборы растут в кристаллизаторах . . . . .	205
Человек растит кристаллы в космосе . . . . .	208



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Работа над этой книгой была начата еще в конце тридцатых годов по совету основоположника советской кристаллографии и кристаллофизики академика Героя Социалистического Труда Алексея Васильевича Шубникова.

— Попробуйте популярно рассказать о кристаллах, об их росте, о структуре и свойствах. А эпиграф к книге можно поставить такой: «Кристаллография — наука скучная, сухая и никому не нужная. Всеобщее мнение», Попытайтесь преодолеть это всеобщее мнение, — предлагал он.

Преодолеть это мнение в ту пору было нелегко. Кристаллография не только считалась, но и на самом деле была тогда наукой отвлеченной, академической, и занимались ею очень немногие в тиши небольших лабораторий.

К тому времени была уже известна атомная структура кристаллов. После величайшего открытия в 1912 г. дифракции рентгеновских лучей в кристаллах было установлено и изучено закономерное расположение атомов, их бесконечные, правильные, симметричные решетки в металлах и в природных минералах. Не вызывало сомнений, что удивительные свойства кристаллов определены их структурой, неизблемым и нерушимым симметричным строем атомов в кристаллах.

Применение, использование свойств кристаллов тогда еще только начиналось. Еще нигде в мире не было промышленности синтетических кристаллов, и только начали развиваться первые лабораторные методы их искусственного выращивания.

Примеры использования кристаллов в технике были тогда единичными: кварц и сегнетова соль для

пъезотехники, рубин для часовой промышленности, каменная соль и флюорит для оптики, алмазы и рубины как высокотвердые минералы — этими немногочисленными, в основном природными кристаллами, да еще драгоценными камнями исчерпывался список монокристаллов, применявшихся человеком.

И только о них и шла речь в первом издании книги «Кристаллы» (Детгиз, 1944).

В следующем, существенно переработанном издании книги (Гостехиздат, 1956) уже гораздо больше рассказывалось о применениях кристаллов, так как в 40—50-х годах зародилась и начала развиваться кристаллофизическая промышленность. Стало возможным говорить о многих отраслях применений кристаллов в технике и об искусственном выращивании кристаллов не только в лабораториях, но и на первых заводах. Но «не разрешена еще проблема выращивания кварца», «может быть, когда-нибудь научатся выращивать алмазы», — так было написано в той книге и как о далеком будущем говорилось, что когда-нибудь научатся создавать кристаллы с заранее заданными свойствами.

И вот теперь автор снова возвращается к книге о кристаллах. Но как же изменились наши представления о кристаллах и содержание кристаллографии за четыре десятилетия, протекавшие с начала работы над этой книгой!

Рентгеноструктурный анализ и электронная микроскопия проникли за грань между живой и неживой природой, исследуя биологические объекты. Атомные постройки в кристаллах удалось непосредственно увидеть. Кристалл «ожил»: стало ясно, что многие его свойства определяются не столько строгой правильностью структуры кристаллов, сколько именно нарушениями этой правильности, разнообразными дефектами структуры, которые в кристалле рождаются, размножаются, движутся, взаимодействуют друг с другом... Не застывшая неподвижность идеального кристалла, а процессы движения характеризуют структуру реального кристалла и определяют многие его свойства.

Необычайно углубилось познание свойств кристаллов и были открыты многие новые свой-

ства. Появились и расширились новые области кристаллографии: кристаллохимия, многие главы



Герой Социалистического Труда,  
академик Алексей Васильевич Шубников  
(1887—1970).

кристаллофизики, учение о симметрии явлений, анти-симметрия и цветная симметрия, биологическая кристаллография, учение о нелинейных свойствах... То, о чем в 50-е годы мечталось как о далеком будущем, сейчас уже полностью осуществлено, — не только



кварц, алмаз, но и многие другие кристаллы выращиваются в лабораториях и на заводах. Большинство из них не существует в природе, они созданы человеком. В лабораториях и на заводах выращивают кристаллы с заранее заданными свойствами.

Если для первого издания книги с трудом можно было насчитать пару десятков кристаллов, выращиваемых в лабораториях, то сейчас невозможно даже перечислить те сотни наименований синтетических кристаллов, которые выращиваются тоннами на многочисленных заводах в разных странах. Пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, оптические и электрооптические кристаллы, акустические кристаллы, ферромагнетики и ферриты, монокристаллы металлов, полупроводники и сверхпроводники — всего не перечислишь!

Трудно найти область науки, которая испытала бы за последние три-четыре десятка лет столь стремительный взлет, столь бурное развитие и смену основных идей, как кристаллография. Теперь уже не приходится кого-либо убеждать в том, как тесно связана кристаллография с физикой, химией, минералогией и геологией, биологией, металловедением, математикой, радиоэлектроникой и самыми различными областями техники.

При новой полной переработке книга разрослась так, что ее пришлось разделить на две. В первой, предлагаемой сейчас читателю, речь идет в основном о росте кристаллов. Вторая книга будет посвящена свойствам кристаллов.

Ясно, что автор не задается целью суммировать все о росте, структуре и свойствах кристаллов и об их бесчисленных применениях. Это и непосильно и не нужно, поскольку за последние годы вышло много хороших книг, от всеобъемлющих монографий до научно-популярных брошюр, освещающих различные аспекты кристаллографии. Задача этой книги и следующей за ней книги «Очерки о свойствах кристаллов» — лишь чуть приоткрыть дверь в удивительный мир кристаллов.

*М. П. Шаскольская*

# Глава I

## МИР КРИСТАЛЛОВ

Ум человеческий открыл много диковинного в природе и откроет еще больше, увеличивая тем свою власть над ней.

В. И. Ленин,  
«Материализм и эмпириокритицизм»

Кристаллы встречаются нам повсюду. Мы ходим по кристаллам, строим из кристаллов, обрабатываем кристаллы на заводах, выращиваем кристаллы в лабораториях и в заводских установках, создаем приборы и изделия из кристаллов, широко применяем кристаллы в технике и в науке, едим кристаллы, лечимся кристаллами, находим кристаллы в живых организмах, проникаем в тайны строения кристаллов, выходим на просторы космических дорог с помощью приборов из кристаллов и растим кристаллы в космических лабораториях.

Что же такое кристаллы?

### В мире камней

В земле иногда находят камни такой формы, как будто их кто-то тщательно выпиливал, шлифовал, полировал. Это — многогранники с плоскими гранями, с прямыми ребрами. Правильные и совершенные формы этих камней, безукоризненная гладкость их граней поражают нас. Трудно поверить, что такие идеальные многогранники образовались сами, без помощи человека. Вот эти-то камни с природной, т. е. не сделанной руками человека, правильной, симметричной, многогранной формой и называются *кристаллами*.



Рис. 1. Кристалл горного хрусталя с Полярного Урала.  
Фото Г. Г. Леммлейна.

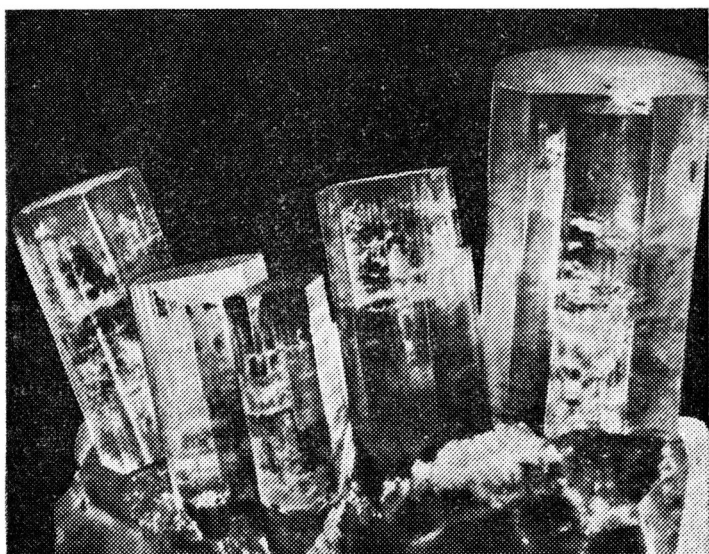


Рис. 2. Кристалл берилла (изумруда). Уменьшено в 4 раза.



Кристаллы, залегающие в земле, бесконечно разнообразны. Размеры природных многогранников достигают подчас человеческого роста и более. Встречаются кристаллы-лепестки тоньше бумаги и кри-



Рис. 3. Кристалл горного хрусталя. Уменьшено в 4 раза.  
Фото М. Я. Вольфовича.

сталлы-пласты в несколько метров толщиной. Бывают кристаллы маленькие, узкие и острые, как иголки, и бывают громадные, как колонны. В некоторых местностях Испании такие кристаллические колонны ставят как столбы для ворот. В музее Горного института в Ленинграде хранится кристалл горного хрусталя (кварца) высотой около метра и весом

больше тонны, который много лет служил тумбой у ворот одного из домов в б. Екатеринбурге (ныне Свердловске).

Многие кристаллы идеально чисты и прозрачны, как вода. Недаром говорят: «прозрачный, как кристалл», «кристально чистый»...

Знакомство с кристаллами мы начнем в Минералогическом музее, где собраны сокровища, найденные



Рис. 4. Человек и кристаллы. Рисунок Карела Чапека.

в недрах Земли. Каких только кристаллов не увидишь в музее! Вот они — правильные многогранники: кубы, призмы, пирамиды, параллелепипеды и другие, пленяющие сложностью и совершенством формы... Столбики, таблички, пластинки, звезды, иглы, лепестки, срóстки, сложные сплетения... Природные формы кристаллов правильны и симметричны, причудливо разнообразны... Чешский писатель Карел Чапек, восхищаясь природными формами кристаллов в коллекциях Британского музея, в своих «Записках из Англии» пишет:

«...Но я должен еще сказать о кристаллах, формах, красках. Есть кристаллы огромные, как колоннада храма, нежные, как плесень, острые, как шипы; чистые, лазурные, зеленые, как ничто другое в мире, огненные, черные; математически точные, совершенные, похожие на конструкции сумасбродных, капризных ученых, или напоминающие печень, сердце... Есть кристаллические пещеры, чудовищные пузыри минеральной массы, есть брожение, плавка, рост минералов, архитектура и инженерное искусство... И в человеке таится сила кристаллизации... Как таинственные математические молнии, пронзают материю бесчисленные законы построения. Чтобы быть равным природе, надо быть точным математически и геометрически. Число и фантазия, закон и изобилие — вот живые, творческие силы природы; не сидеть под зеленым деревом, а создавать кристаллы и идеи, вот что значит быть воедино с природой!»

### Формы кристаллов

Рассмотрим внимательно кристаллы разных веществ. Как отличить их друг от друга? По цвету? По блеску? Нет, это признаки ненадежные. К примеру, кристаллы кварца могут быть бесцветными (горный хрусталь), золотистыми, коричневыми, черными (дымчатый горный хрусталь, морион), сиреневыми, лиловыми (аметист). Разные названия, но минерал один и тот же, кварц, один из самых распространенных минералов на Земле, один из самых широко применяющихся в промышленности.

В музее Горного института в Ленинграде хранится коллекция кристаллов природного корунда сорока различных цветов и оттенков: кроваво-красный рубин, лазорево-синий или голубой сапфир, бесцветный лейкосапфир, черный наждак — всё это один и тот же минерал корунд, или окись алюминия,  $Al_2O_3$ .

В то же время, например, прозрачно-золотистыми могут быть и кварц, и топаз, и турмалин, и циркон, и многие другие минералы. К тому же, у разных образцов одного и того же минерала цвета и оттенки могут быть совсем разными.



Приглядевшись к кристаллам внимательнее, нетрудно увидеть их особенность: гораздо более характерную: *кристаллы разных веществ отличаются друг от друга своими формами.*

Кубики кристаллов каменной соли не спутаешь со столбиками берилла или с табличками медного купороса (рис. 5); от шестигранных призм — «карандашников» кварца с первого взгляда можно отличить

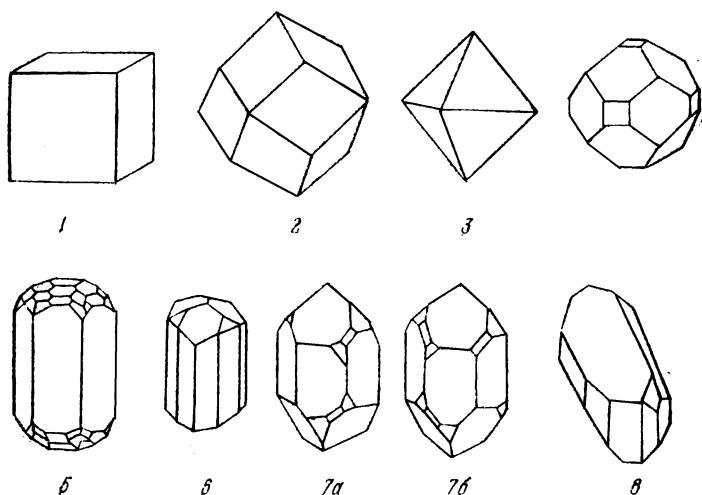


Рис. 5. Кристаллы разных веществ отличаются друг от друга по своей форме: 1 — каменная соль, 2 — гранат, 3 — алмаз, 4 — квасцы, 5 — берилл, 6 — турмалин, 7а и 7б — кварц, 8 — медный купорос.

восьмигранные кристаллы алмаза; такая форма восьмигранника называется *октаэдром*.

Так что же, у каждого вещества есть своя характерная форма, по которой можно его узнавать?

И да, и нет. Да, у каждого вещества формы кристаллов характерны. Однако формы кристаллов разных веществ могут быть очень похожими. А главное не в этом. Не всегда кристалл попадет к нам в руки в его естественной многогранной форме. Отнюдь не всегда вырастает кристалл многогранником — это удастся ему лишь при благоприятных условиях, когда ничто не мешает ему при росте.

Давно прошли те времена, когда считали, что кристаллы — это только естественные многогранники, и поэтому думали, что кристаллы встречаются редко, считали их «игрой природы». Да, правда, кристаллы-великаны, например такие, как горный хрусталь на рис. 1, попадаются не так уж часто. Однако кристаллы окружают нас повсюду. Только их не всегда можно увидеть простым глазом. Посмотрите в лупу

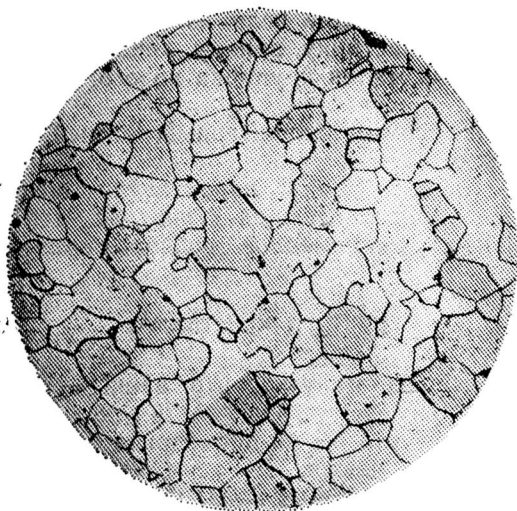


Рис. 6. Кристаллические зерна в металле. Увеличено в 600 раз.

на самый обыкновенный булыжник или на излом любого металла (рис. 6), и вы увидите, что камни и металлы сложены из отдельных кристаллов, только эти кристаллики — очень мелкие, сросшиеся друг с другом.

Кристаллы не надо специально искать. Наоборот, не найдешь таких металлов и почти не встретишь таких камней, которые не были бы кристаллическими. Но в большинстве своем камни и металлы — это *поликристаллы*, т. е. сrostки многих мелких кристаллических «зерен», и в этих сrostках уже неразличимы многогранные формы отдельных *монокристаллов*. Да и не только неразличимы. Этих форм просто нет,

и не вырастает монокристалльное зерно многогранником потому, что со всех сторон теснят его другие такие же монокристаллы. Поэтому в очертаниях зерна уже не остается следов многогранника.

Нередко образуется поликристалл столь мелкозернистый, что и в лупу, и в микроскоп нельзя различить в нем отдельные кристаллики. А как тогда убедиться в его кристаллическом строении? И как определить, что это — кристалл, если он вырос не многогранным? Да еще если из него вырезали или вышлифовали пластинку, призму, линзу, или если нам досталась лишь малая крупинка нового, неизвестного вещества?

Каков же самый характерный, самый основной признак кристалла?

Ответ гласит: *самая характерная особенность кристалла — это его атомная структура, правильное, симметричное, закономерное расположение атомов.*

## Структура кристаллов

Вообразите на минутку, что ваши глаза стали столь зоркими, что могут разглядеть отдельные атомы или молекулы. Куда вы ни посмотрите теперь, вы заметите движение частиц. Во всем мире вы не найдете ни одного атома или иона, ни одной молекулы, которые покоились бы: все они движутся, но движения эти различны. Взглянув на газ, вы увидите беспорядочное движение множества частиц (атомов, ионов, молекул): отдельные частицы, непрерывно дзигаясь, сталкиваются друг с другом, отскакивают в стороны, снова налетают на другие частицы — неустанно, непрерывно происходит быстрая, хаотичная пляска атомов и молекул. Беспорядочно движутся частицы и в жидкости, хотя здесь они размещены уже теснее, каждая из них как бы стремится держаться поближе к соседям. И совсем по-иному движутся частицы в кристаллах.

Кристаллы построены правильно, строго закономерно. И в них тоже атомы, ионы, молекулы не находятся в покое; но частицы не сталкиваются друг с другом, потому что все они расположены правиль-

ным строем и каждая может только колебаться около определенного положения.

Представьте себе, что ваш рост настолько уменьшился, что вы смогли войти внутрь кристалла. Вы увидите, что вокруг вас во все стороны тянутся ровные бесконечные ряды частиц (см., например, рис. 7).

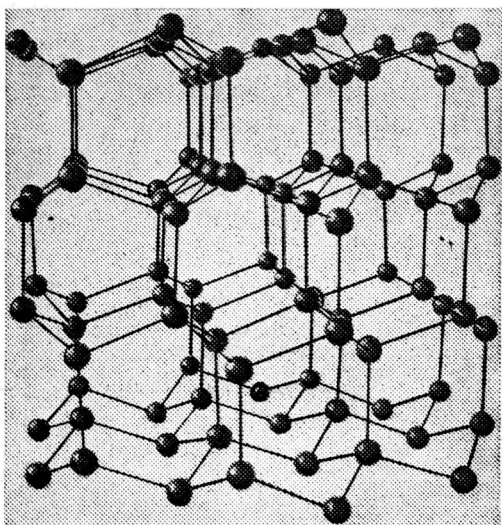


Рис. 7. Модель атомной решетки кристалла алмаза.

Эти правильные ряды частиц в пространстве, трехмерные решетки из атомов, образуют *кристаллическую структуру*.

Если бы мы могли совершить нашу воображаемую прогулку — войти внутрь различных кристаллических веществ и идти по рядам частиц, как по шпалам рельсового пути, — мы увидели бы, что структура всех кристаллических веществ периодична и закономерна. Во всех кристаллах частицы выстраиваются симметричными правильными рядами, плоскими сетками, трехмерными решетками.

Что происходит, когда жидкость, застывая, превращается в твердое тело, например, когда вода, замерзая, становится твердым льдом или когда засты-

вает расплавленный металл? При этом меняется характер движения частиц, слагающих вещество. В твердом кристаллическом веществе каждая частица движется «вольно», колеблется, но только у своего места в строю. Строй частиц в кристаллическом веществе похож на пчелиные соты или на строительные леса: вправо и влево, вперед и назад, вверх и вниз

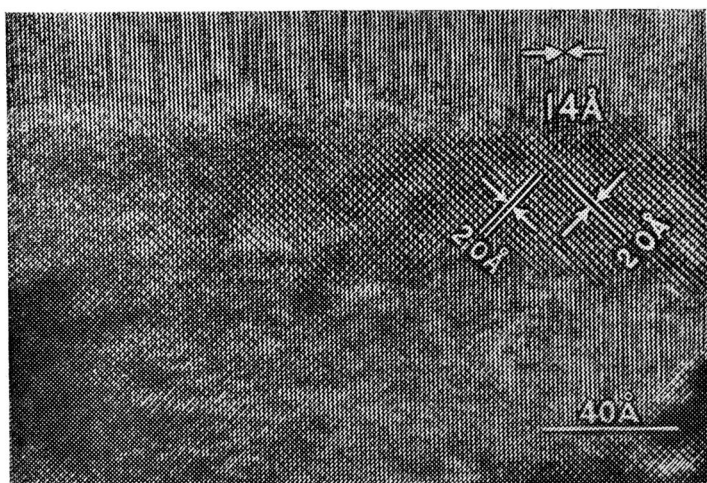


Рис. 8. Атомные ряды в кристалле золота. Снято в электронном микроскопе. Увеличено в 8000 раз.

тянутся ровные, правильные, бесконечные ряды частиц. Атомы выстроены, как физкультурники в строю, но не стоят строго неподвижно, а колеблются около своих мест, как будто переминаются с ноги на ногу, нетерпеливо ожидая команды: «Разойдись!».

Однако разойтись, выйти из строя частицы твердого тела могут, только если, например, нагреть кристалл так, чтобы он начал плавиться. Под теплыми лучами весеннего солнца нагревается, начинает таять лед: это разрушается строй частиц в кристалле льда, ослабевают силы, удерживающие частицы на своих местах. Скрылось солнце, снова подморозило, закружились в воздухе снежинки, застыла капель сосуль-

ками — это опять частицы собрались правильным строем, ровными рядами, начинают расти кристаллы льда или снега.

*Порядок, закономерность, периодичность, симметрия расположения атомов* — вот что характерно для твердого тела. Во всех кристаллах, во всех твердых

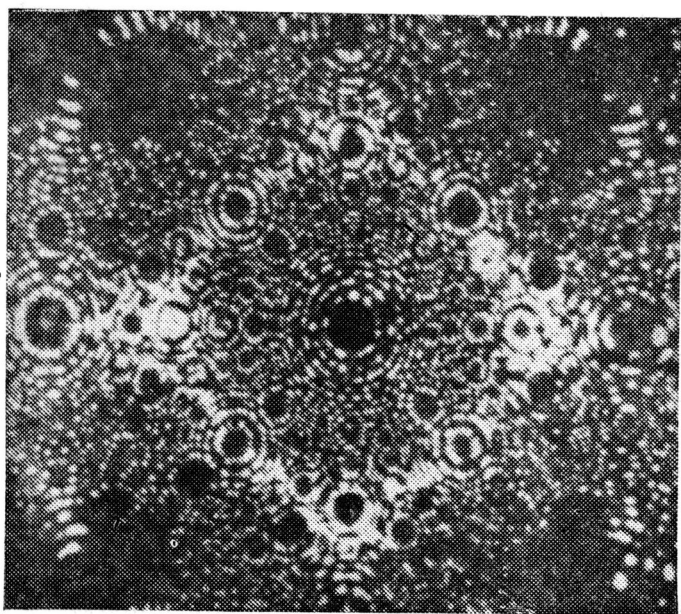


Рис. 9. Атомные сетки и отдельные атомы в кристалле платины. Снято в автоионном микроскопе.

веществах частицы расположены правильным, четким строем, выстроены симметричным, правильным, повторяющимся узором. Пока есть этот порядок — существует твердое тело, кристалл. Нарушен порядок, рассыпался строй частиц — это значит, что кристалл расплавился, превратившись в жидкость, или испарился, перейдя в пар.

Одинаков ли порядок, строй атомов в разных твердых телах? Конечно, нет. Природа бесконечно

разнообразна и не любит повторения. Строй атомов железа совсем не похож на постройку кристалла льда. В каждом веществе есть именно свой, характерный узор и порядок расположения атомов. И от того, каков этот порядок, зависят свойства вещества. Одни и те же атомы, частицы одного сорта, располагаясь по-разному, образуют вещества с совсем разными свойствами.

Посмотрим, например, на атомы углерода.

*Сажа*, или *копоть*, — мягкий черный порошок, собирающийся на дне кастрюли или в печной трубе, выбрасываемый черными клубами дыма из труб, — это углерод.

*Уголь*, древесный или каменный, — это тоже углерод.

*Графит*, мягкий стерженок карандаша, оставляющий след на бумаге. В технике графит служит не только для карандашей: этот материал выдерживает очень высокие температуры, и поэтому из него делают огнеупорную посуду. Графит — кристалл, сложенный из атомов углерода.

Есть и другая форма кристаллов углерода — *алмаз*, самый дорогой и самый красивый из драгоценных камней. Граненый алмаз называют бриллиантом. Не каждому довелось видеть бриллианты, но все знают крохотный кристаллик алмаза, вставленный в металлическую оправу, которым легко режет стекло стекольщик. Алмаз очень твердый, он тверже всех камней на Земле. Алмазом можно резать, шлифовать, сверлить любые твердые камни и металлы.

Трудно поверить, что алмаз и графит сложены из одних и тех же атомов углерода (рис. 10). Графит мягкий, непрозрачный, черный. Алмаз — твердый, прозрачный, искрящийся всеми цветами радуги. Графит — огнеупорный, алмаз легко горит. В пламени кислорода драгоценный бриллиант сгорает полностью, остается лишь кучка сажи или графит. Попробуй после этого сомневаться в том, что алмаз, графит и сажа состоят из одних и тех же атомов углерода, а разница лишь в том, каков порядок расположения этих атомов. Расставлены они одним строем — и возникает мягкий черный графит. Перестроятся по-другому — и получится твердый прозрачный алмаз.



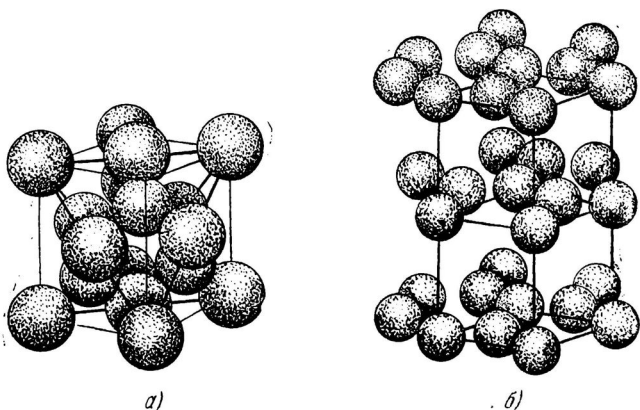


Рис. 10. Модели атомного строения алмаза (а) и графита (б).

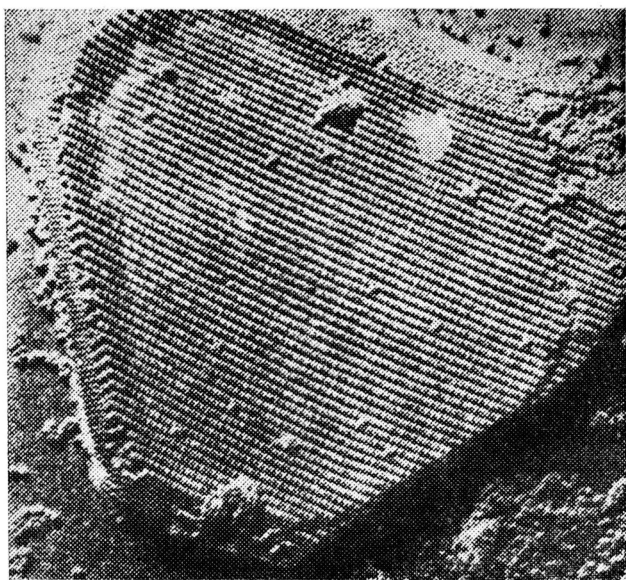


Рис. 11. Кристалл вируса мозаичной болезни табака. Снято в электронном микроскопе.

*Структура кристалла определяет свойства вещества и его форму.* А правильная многогранная форма — это следствие атомной структуры. Плоские грани кристалла отвечают плоским сеткам кристаллической решетки, острые прямые ребра — рядам атомов в решетке.

Каждое кристаллическое вещество можно отличить от других кристаллических веществ по его атомной структуре. В одних кристаллах решетки очень простые, в других — очень сложные. В разных веществах различны расстояния между частицами в решетке. Но все эти расстояния очень малы, это — стомиллионные доли сантиметра (ангстремы).

Во всех кристаллических веществах атомы, ионы, молекулы образуют симметричные ряды, сетки и решетки. Правильное повторяющееся симметричное расположение частиц обязательно для кристаллов; оно является их характерной особенностью, отличающей их от некристаллов. На вопрос, что такое кристаллы, ответ таков: *кристаллы — это вещества, в которых составляющие их частицы (атомы, ионы, молекулы) расположены строго периодически, образуя геометрически закономерную кристаллическую структуру.*

Кристаллическая структура обнаружена не только в природных многогранниках камней, в кристаллических горных породах и в металлах, но и в очень многих других телах, о которых никому и в голову не приходило подумать, что они тоже состоят из кристаллов. Уж на что, казалось бы, глина не похожа на кристаллы, но и она состоит из мельчайших кристаллических частичек. Даже в таких веществах, как обыкновенная сажа, человеческие кости, волосы, волокна шерсти, шелк, целлюлоза и т. п., обнаружено кристаллическое строение (см., например, рис. 11).

Громадное большинство твердых веществ на Земле являются кристаллическими. Только эти кристаллы — большей частью не те прекрасные многогранники, которыми мы любуемся в музеях, а крохотные, подчас невидимые глазом зернышки. Однако внутреннее строение таких невзрачных зернышек столь же красиво и удивительно закономерно, как и строение чудесных больших многогранников.

## Как исследуют структуру кристаллов

Первые, еще смутные предположения о том, что атомы в кристаллах расположены правильным, закономерным, симметричным строем, высказывались в трудах различных естествоиспытателей еще в те времена, когда само понятие атома было неясным и не было никаких экспериментальных доказательств атомного строения вещества.

Симметричная внешняя форма кристаллов невольно наводила на мысль о том, что и внутреннее строение кристаллов должно быть симметрично и закономерно. Законы симметрии внешней формы кристаллов были полностью установлены в середине XIX в., а к концу этого века были четко и точно выведены законы симметрий, которым подчинены атомные постройки в кристаллах.

Замечательный ученый, профессор Ленинградского горного института Евграф Степанович Федоров (1853—1919) строго математически вывел все возможные геометрические законы симметрии расположения частиц внутри кристаллов. Федоровский вывод представлял собой исполинский труд, значение которого станет для нас особенно ясным, если мы вспомним, что и само существование атомов еще ставилось тогда (в конце XIX в.) под сомнение. На основе строгого расчета Федоров описал и перечислил все возможные законы симметрии расположения частиц в кристалле так, как будто он видел их своими глазами!

Одновременно с Федоровым вывод законов симметрии был сделан немецким математиком Шенфлисом. Эти два ученых, один в России, другой в Германии, умозрительно выводили законы симметрии структур разными методами, вначале не зная друг о друге. Потом они вступили в дружескую переписку и закончили вывод почти одновременно. Каждый из них трудился около десяти лет. Скажем об их научном подвиге словами академика Алексея Васильевича Шубникова: «Теория вывода пространственных групп симметрии, на двадцать с лишним лет опередившая экспериментальное проникновение в область исследования структуры кристаллов, служит блестящим примером научного предвидения».

Как же доказать, что закономерные расположения частиц в кристаллах действительно существуют? Их ведь нельзя увидеть ни глазом, ни в оптический микроскоп. И не потому, что плох микроскоп. Мощные микроскопы, в сотни и тысячи раз увеличивающие изображение, совершенствуются с каждым годом. Но никогда не удастся увидеть атом в оптический микроскоп, как бы совершенна ни была его конструкция. Дело тут не в микроскопе, а в свете. Световые волны слишком велики по сравнению с атомами.

Видели ли вы волны на море? Одна за другой катятся они, ударяя о берег, рассыпаясь брызгами и откатываясь назад. И вот представьте себе, что где-то в море плавает маленькая соринка. Подходит гребень волны — он поднимает соринку вверх. Волна спадает — соринка опускается. Волна прошла — и соринка все так же качается на глади моря. А волна идет дальше, вот она уже дошла до берега, и мы видим, как она бьется о прибрежные камни. Заметен ли на волне какой-нибудь след соринки? Можно ли по какому-либо признаку установить, что на пути волны подалась соринка? Нет, волна не изменилась, соринка слишком мала для нее. Глядя на волну, набегавшую на берег, мы не узнаем ничего о тех мелких соринках, которые встретились на ее пути.

Подобно соринке на морской волне, отдельный атом также не оставит «следа» на световой волне: атомы слишком малы для волн видимого света.

Так что же, неужели надо отказаться от мечты увидеть атомы или атомные постройки в кристаллах? Нет, их сумели разглядеть.

Теория строения кристаллов к концу XIX в. была разработана. Но всегда можно было возразить, что это — просто остроумная догадка, ведь кристаллических решеток в то время никто не видел, требовалось еще доказать их существование. Для этого надо было найти какой-то свет с очень короткими волнами.

Таким «светом» оказались лучи Рентгена, открытые в 1895 г. Сам Рентген назвал открытое им излучение «икс-лучами», т. е. таинственными, загадочными лучами. Это название и до сих пор сохраняется в ряде стран. Природа и свойства рентгеновских лучей в те годы еще не были поняты. Как ни изощря-

лись исследователи, им не удавалось наблюдать отражение рентгеновских лучей от зеркала или преломление их в стеклянной призме, их интерференцию или дифракцию. Как бы искусно ни были сделаны рукой человека стеклянные зеркала, призмы или решетки, они слишком грубы для рентгеновских лучей. Самое лучшее стеклянное зеркало оказывается для этих лучей не ровной плоскостью, а грубо вспаханным полем.

К началу XX в. были изучены многие свойства рентгеновских лучей, но загадкой оставалась сама их природа. Предполагали, что она такая же, как

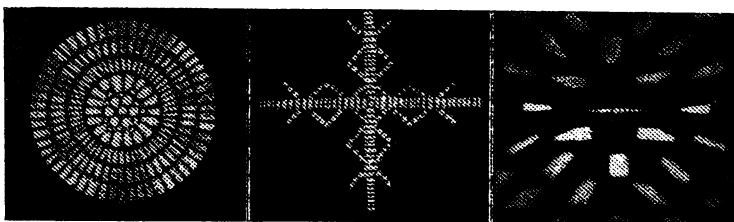


Рис. 12. Картины, получающиеся при дифракции света на двумерных решетках.

у лучей света, только длина их волн гораздо меньше, чем у видимого света, но доказать это опытом, не смотря на многие попытки, не удавалось.

Посмотрите ночью из окна на удаленный источник света через носовой платок. Глазу представится красивая симметричная картина. Вместо одной светящейся точки видно много таких точек, расположенных правильным узором (рис. 12). Потяните ткань по диагонали, и узор изменится: симметрия узора определяется симметрией сетки. Светлых точек будет тем больше, чем мельче решетка взятой ткани, т. е. чем больше в ней дырочек и чем ровнее плетение. Однако если сетка будет слишком мелкой, явление опять пропадает. Здесь на элементарном опыте мы видим дифракцию света на двумерной решетке. Для получения дифракции нужно, чтобы длина волны и размер отверстий (щелей) и промежутков между ними в решетке были примерно одинаковыми.

В конце XIX и в начале XX вв. было много попыток обнаружить дифракцию рентгеновских лучей, но все они кончались безрезультатно. Не удавалось изготовить решетку с размерами, близкими к длинам волн лучей Рентгена.

Впрочем, тогда еще этих длин волн не знали. Лишь теоретические рассуждения показывали, что если лучи Рентгена представляют собой волны, то длина этих волн должна быть не больше стомиллионных долей сантиметра (ангстремов). С другой стороны, совсем иные рассуждения, основанные на теории строения кристаллов, приводили к выводу, что расстояния между частицами в кристаллах должны быть тоже порядка ангстремов.

Не удивительно, что в 1912 г. немецкому физику Лауэ пришла в голову остроумная идея: а почему бы не воспользоваться естественными кристаллическими решетками, т. е. атомной структурой кристаллов, чтобы обнаружить дифракцию рентгеновских лучей?! Эта мысль показалась настолько смелой и оригинальной, что физики, с которыми Лауэ говорил о ней, дружески посмеялись над ним и заключили шуточное пари сроком на месяц. Лауэ брался в течение месяца обнаружить явление дифракции рентгеновских лучей на кристаллических структурах.

Лауэ поручил решение этой задачи двум юношам, работавшим в его лаборатории, Фридриху и Книппингу. Юные физики принялись за дело. Они вырастили кристаллик медного купороса (см. кристалл 8 на рис. 5) и стали пропускать через него пучок рентгеновских лучей, стараясь сфотографировать узор, который должен был, по их мнению, получиться в результате дифракции. Сначала они думали, что дифракционный узор выявится, если поставить фотопластинку между кристаллом и источником рентгеновских лучей или же сбоку от кристалла. Как потом оказалось, расчет их был неверен. Поэтому, сколько молодые люди ни старались, ничего не получалось. Срок пари истекал, а идея Лауэ по-прежнему оставалась недоказанной и казалось, что их старания не увенчаются успехом. И вот, решив сделать последний опыт перед тем, как бросить работу, Книппинг поставил фотографическую пластинку не сбоку от

кристалла, как всегда, а за кристаллом (рис. 13). И что же? На фотопластинке появилось много пятен

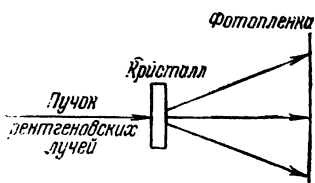


Рис. 13. Схема опыта Лауэ по дифракции рентгеновских лучей в кристаллах.

от пучка рентгеновских лучей, испытавшего дифракцию на кристаллической решетке. Пятна располагались симметричным узором, очень похожим на те узоры, которые получаются, если глядеть сквозь ткань на далекий огонек.

Замечательным открытием дифракции рентгеновских лучей в кристаллах

были решены сразу две задачи: во-первых, было доказано, что рентгеновские лучи, как и видимый свет, имеют волновую природу; во-вторых, больше не оставалось сомнений в реальности существования кристаллических решеток.

Рентгеновский снимок кристалла (рентгенограмма) имеет вид сложного узора, составленного из множества пятнышек или полос. Каждое такое пятнышко представляет собой след отражения рентгеновских лучей от определенной системы внутренних плоскостей в кристаллической решетке. Так как эти плоскости расположены в кристалле симметрично, то и пятна на рентгенограмме располагаются правильно, симметрично, по определенным законам (рис. 14).

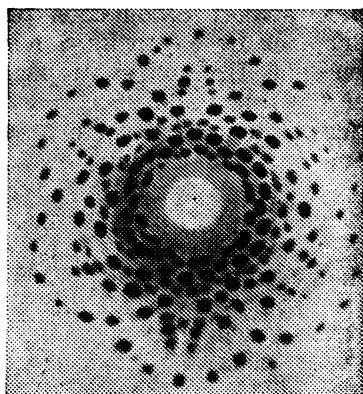


Рис. 14. Рентгенограмма кристалла кварца.

Кто не знает веселую игру — ловлю зеркалом солнечных зайчиков? Зеркальце может быть совсем маленьким, но лучи Солнца отражаются от него, и «зайчик» виден далеко. Такие же «зайчики» от рентгеноз-

ских лучей, отраженных, как на зеркалах, на атомных плоскостях кристалла, проявляются на фотографической пластинке, когда рентгеновские лучи проходят сквозь кристалл.

Представьте себе «зайчик» от солнечного блика, сверкнувшего на штыке одного солдата. Его не увидишь дальше, чем за несколько десятков шагов. Но если солдаты целой роты одновременно сделают одно и то же движение, то солнечный блик от множества штыков, одновременно сверкнувших на солнце, будет виден уже за километры. Нечто подобное происходит и в кристалле. «Зайчики» от отдельных атомов или от атомных плоскостей, конечно, очень слабы. Но они во много раз усиливаются благодаря тому, что и атомов и атомных плоскостей в кристалле бесчисленное множество. Отдельные слабые «зайчики», складываясь вместе, образуют яркие пятна на рентгенограмме. Так появляется на фотографической пластинке причудливый узор из пятнышек, каждое из которых представляет собой след рентгеновских лучей, отразившихся от внутренних плоскостей кристаллической решетки. По картинам рассеяния рентгеновских лучей атомами, ионами, молекулами можно судить о расположении частиц и о кристаллической структуре вещества. Все это мы знаем теперь, когда рентгеноструктурный анализ стал основным методом исследования структуры кристаллов.

Опыт Лауэ в 1912 г. показал, что с помощью дифракции рентгеновских лучей можно обнаружить атомную структуру кристалла. До тех пор ее только предугадывали, предсказывали, а здесь впервые было получено реальное доказательство того, что атомы в кристаллах построены закономерными рядами, сетками, решетками.

Закончился многовековой путь догадок — началась новая эпоха экспериментального исследования структуры кристаллов.

Самому Лауэ не сразу удалось расшифровать рентгенограмму. Дело в том, что трудно было бы сделать для первого опыта худший выбор, чем кристалл медного купороса. Эти синие кристаллики очень легко и красиво растут из растворов, их и теперь часто ис-



пользуют для школьных опытов по росту кристаллов. Но у медного купороса симметрия наименьшая из всех возможных и относительно сложная структура. Поэтому, какие бы дифракционные эффекты ни наблюдались, объяснить их было крайне трудно.

В том же 1912 г. первая структура кристалла была расшифрована. Английские ученые Виллиам Генри Брэгг (1862—1942) и его сын Виллиам Лоренс Брэгг (1890—1971), повторяя эксперимент Лауэ, выбрали для своих опытов кристалл с очень простой структурой и высокой симметрией — каменную соль.

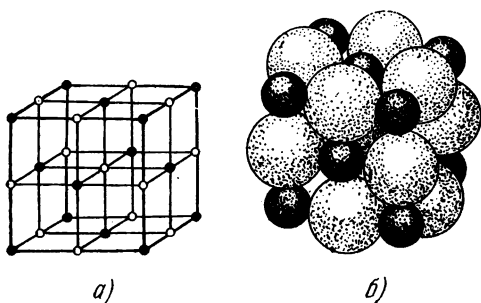


Рис. 15. Схема (а) и модель (б) расположения ионов в кристалле каменной соли (хлористого натрия). Мелкие темные шары — катионы натрия, крупные светлые — анионы хлора.

А самое главное заключалось в том, что, в отличие от Лауэ, В. Л. Брэгг заранее задался рабочей гипотезой о структуре кристалла. На основании внешней формы кристалла и его физических свойств и химической природы Брэгг предположил, что у хлористого натрия (каменной соли) структура состоит из чередующихся одинаково заряженных ионов натрия и хлора: как бы трехмерная шахматная доска. Так и оказалось.

Теперь структура каменной соли (хлористого натрия) нам хорошо известна. На рис. 15 приведена ее схема и модель. На схеме точками-шариками показаны места, около которых колеблются ионы, а модель построена из шариков, размеры которых примерно соответствуют размерам ионов: анион хлора

больше, чем катион натрия. Такова же структура хлористого калия, фтористого натрия, иодистого натрия, фтористого лития, хлористого серебра, окиси магния и многих других веществ. Схема структур для них одна, а модели должны различаться размерами шариков.

«Как мы теперь знаем,— рассказывал В. Л. Брэгг на склоне лет в лекции, посвященной полувековому юбилею рентгеноструктурного анализа,— эта неорганическая структура представляет собой чередование положительно и отрицательно заряженных ионов, которые удерживают друг друга силами своего электростатического взаимодействия. В настоящее время эта идея так укоренилась в нашем сознании, что трудно представить себе, сколь новой была она тогда и как трудно было химикам на первых порах принять ее».

Задавшись представлением о кристаллической структуре каменной соли, Брэгг показал, что такая структура действительно объясняет все пятна, обнаруженные на рентгенограмме.

«Уже в этих ранних исследованиях структур,— говорил В. Л. Брэгг в той же лекции,— выявилась та особенность рентгеноструктурного анализа, которая характеризует все его дальнейшее развитие. Этот анализ дает нам трехмерную географическую карту расположения атомов в кристалле».

В. Л. Брэгг и за полгода до него московский профессор-кристаллограф Юрий Викторович Вульф (1863—1925) вывели математическую формулу — закон Вульфа — Брэгга, позволяющий анализировать дифракцию рентгеновских лучей в кристаллах и расшифровывать структуры любых кристаллических веществ.

По словам академика А. В. Шубникова, «открытие дифракции рентгеновских лучей произвело полный переворот в кристаллографии. Появилась совершенно новая область кристаллографии — рентгеноструктурный анализ, дающий возможность изучать атомную структуру кристаллов. Примерно в то же время возникла необходимость искусственно выращивать кристаллы для их практического применения (кварц, слюда, алмаз, рубин и др.). Дальнейшее развитие кристаллографии пошло с этого времени по двум руслам: 1) выращивание и применение искусственно выращен-

ных кристаллов и изучение процессов их роста и свойств; 2) изучение атомной структуры кристаллов».

В наши дни с помощью рентгеноструктурного анализа изучено атомное строение более 20 тысяч кристаллических веществ. По симметрии рентгенограммы, по взаимному расположению пятен на ней и по их относительным яркостям можно определять симметрию кристалла, взаимное расположение его атомных плоскостей, расстояния и углы между этими плоскостями в структуре. Но это только начало.

«Это каркас, на котором строится структура кристалла», — говорит кристаллограф Кэтлин Лонсдейл (1897—1973), ученица В. Л. Брэгга. «Решетка дает нам размер и форму повторяющейся единицы структуры, ее элементарную ячейку, но не определяет того, каково же расположение вещества внутри элементарной ячейки. На первом этапе это и не важно. Стальной остов здания должен существовать прежде, чем начнется обсуждение внутреннего убранства или мебелировки».

Установить «внутреннее убранство», т. е. разгадать, как реально расположены частицы в структуре, — это второй, значительно более трудный этап, осложненный вдобавок тем, что атомы непрерывно движутся, колеблются около своих положений равновесия.

Выше мы говорили о том, как, взглянув через платок на дальний фонарь, можно увидеть картину дифракции света на плоской сетке. По этой картине можно судить о размерах и форме клеточек ткани, из которой сделан платок. Но попробуйте по этой картине определить, какого цвета платок и какие на нем узоры, да еще из ситца он или из полотна. А структурщик — исследователь структуры кристалла — решает несравненно более сложную задачу: по рентгенограмме, т. е. по симметричному узору темных пятен, он как бы разгадывает трехмерный кроссворд, расставляя атомы в структуре по их местам.

И этот кроссворд тем хитрее и запутаннее, чем больше атомов в ячейке и чем больше у них «охоты к перемене мест» и возможностей таких перемен. Мы уже видели: первой разгаданной структурой была каменная соль. Здесь структура очень проста: ионы

хлора чередуются с ионами натрия, как темные и светлые поля на шахматной доске. Но чем сложнее химическая формула вещества, тем сложнее его структура.

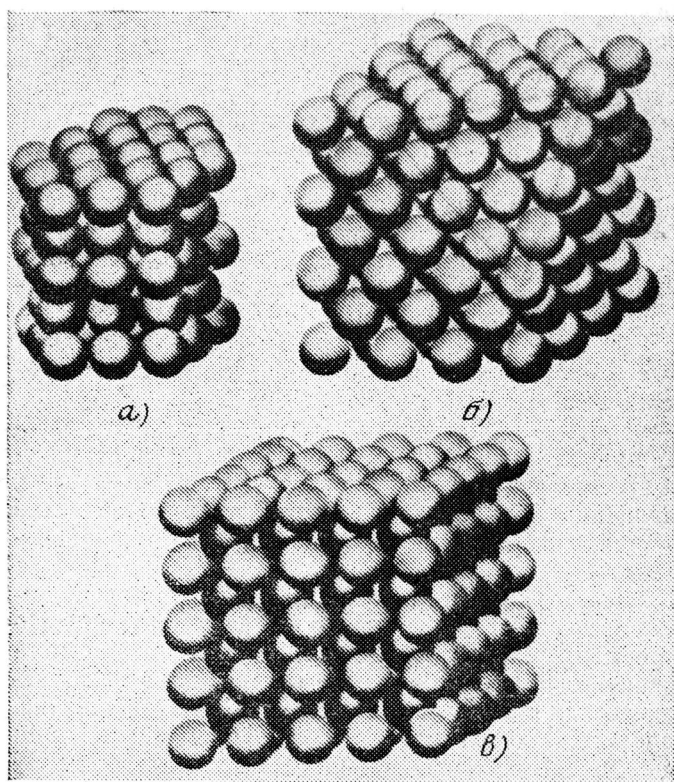
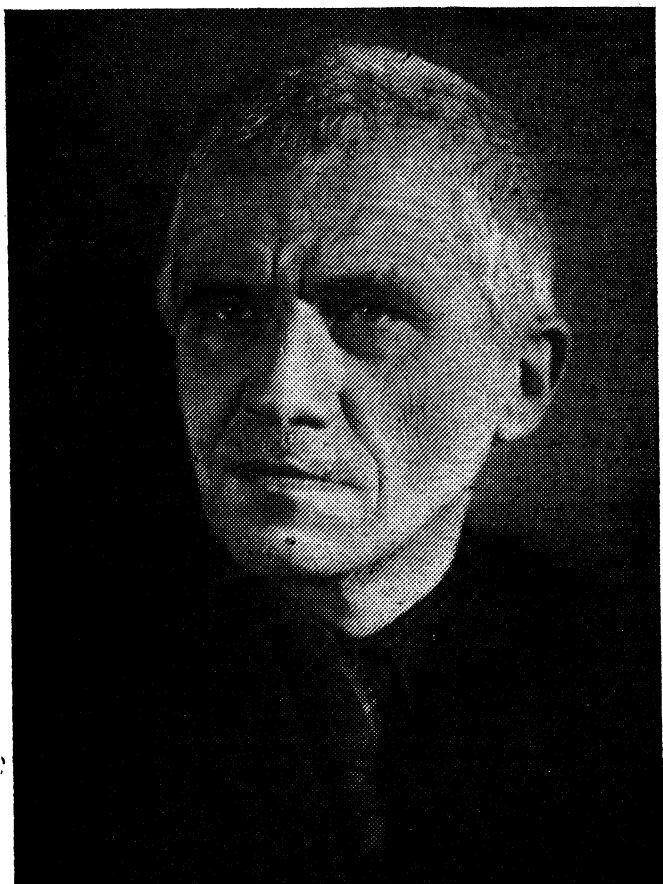


Рис. 16. Модели структур металлов: магний (а), медь (б), вольфрам (в).

Очень просты структуры элементарных металлов. На рис. 16 показаны их модели, причем атомы изображены шариками одинаковых размеров. Рис. 16, б показывает строение меди, золота, серебра, алюминия, свинца, никеля, платины и некоторых других

металлов, рис. 16, а — строение магния, цинка, кадмия, таллия, гафния, бериллия, стронция, осмия. В этих



Герой Социалистического Труда,  
академик Николай Васильевич Белов.

двух структурах шарики-атомы упакованы наиболее  
плотно, плотнее уложить их нельзя.

Интересно, что такая экономная, наиплотнейшая упаковка осуществляется природой не только в кристаллах: по типу рис. 16, а пчелы строят свои соты, — видимо, потому, что при этом наиболее экономно расходуется материал и наиболее прочны постройки.

Структуры, показанные на рис. 16, в, тоже плотные, но уже не самые плотные. Так кристаллизуются вольфрам, молибден и многие тугоплавкие металлы.

Почти все чистые металлы кристаллизуются в виде этих трех структур, а в металлических соединениях так располагаются атомы металла, а маленькие атомы кремния, углерода, кислорода, азота, водорода размещаются в пустотах между ними, образуя силициды, карбиды, окислы, нитриды, гидриды.

В ионных кристаллах между большими анионами размещаются меньшие катионы \*). Смотря по тому, как заполнены пустоты между шарами, образуются разные типы взаимного расположения катионов и анионов, а значит, и разные типы кристаллических структур. «По характеру анионов соответствующего «анионного моря», в котором разыгрываются минералогические события, мы различаем «мир» окислов, «мир» сульфидов, «мир» галогенидов. Все же разнообразие минералогического мира внутри каждого из этих крупных подразделений, вся «минералогическая игра» сводится к распределению катионов по пустотам плотнейшей упаковки. Катионы заселяют не все пустоты, но часть их по определенному симметричному узору, и самые пустоты («дырки») в плотнейшей упаковке не одного сорта». Эта яркая картина дана основоположником теории кристаллических структур, академиком, Героем Социалистического Труда Николаем Васильевичем Беловым.

Разнообразие структур сводится к различным способам заселения пустот в плотнейшей упаковке атомов. Но в таких моделях, как на рис. 16, именно пустоты видны плохо, их заслоняют большие шары.

Николай Васильевич Белов и американский кристаллограф Лайнус Полинг, прославленный лауреат двух Нобелевских премий — премии Мира и премии

---

\*) В редких случаях соотношение размеров аниона и катиона может быть и обратным.

за работы в области структурной кристаллографии,—придумали иной метод построения структурных моделей. Центры анионов, окружающих катион, мысленно соединяются прямыми линиями и таким образом получаются как бы модели «жизненного пространства», занятого катионом, а из них затем строится модель структуры кристалла (рис. 17). Н. В. Белов и поколения его учеников разгадали строение множества сложных кристаллических неорганических соединений и минералов. За цикл работ по структурной минералогии академику Белову в 1974 г. была присуждена Ленинская премия.

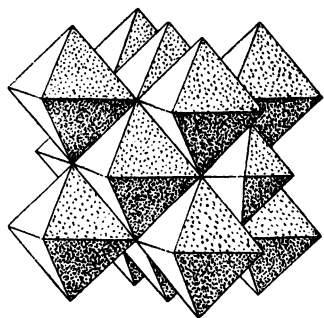


Рис. 17. Модель структуры каменной соли по Н. В. Белову.

Структуры органических соединений еще сложнее, и не удивительно, что первые структуры органических кристаллов удалось изучить лишь спустя три десятка лет после открытия дифракции рентгеновских лучей в кристаллах, т. е. к тому времени, когда были уже установлены структуры многих тысяч неорганических кристаллов.

Неприступной крепостью казалась сложность строения элементов живой материи — биологических молекул (рис. 18).

В 1964 г. профессор Дороти Ходчкин в Оксфорде в результате восьмилетнего труда сумела разрешить кристаллическую структуру витамина  $B_{12}$ . Молекула его содержит 180 атомов. Это был блестящий пример расшифровки структур с помощью рентгеновских лучей. Дороти Ходчкин получила за это исследование Нобелевскую премию.

Посмотрите на рис. 19. На нем показана модель молекулы миоглобина, построенная англичанином Кэндрию с сотрудниками; чтобы разгадать эту структуру, Кэндрию промерил вручную 250 тысяч отражений на рентгенограмме. Молекулярный вес миоглобина 18 000, в его ячейке 2500 атомов.

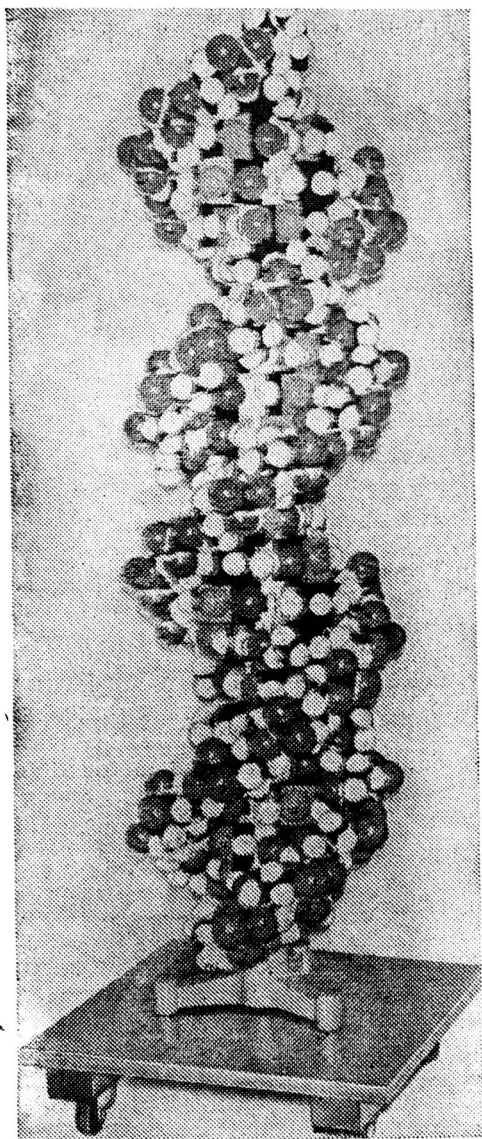


Рис. 18. Модель структуры кристалла дезоксирибонуклеиновой кислоты.



Внизу справа на той же фотографии затерялся маленький кубик. Это выполненная в том же масштабе модель структуры каменной соли. А сколь длинна история ее расшифровки и каким триумфом науки была разгадка ее структуры в 1912 г.! Сравните эти две структуры — можно ли более наглядно показать успех рентгеноструктурного анализа за первые полвека его существования!

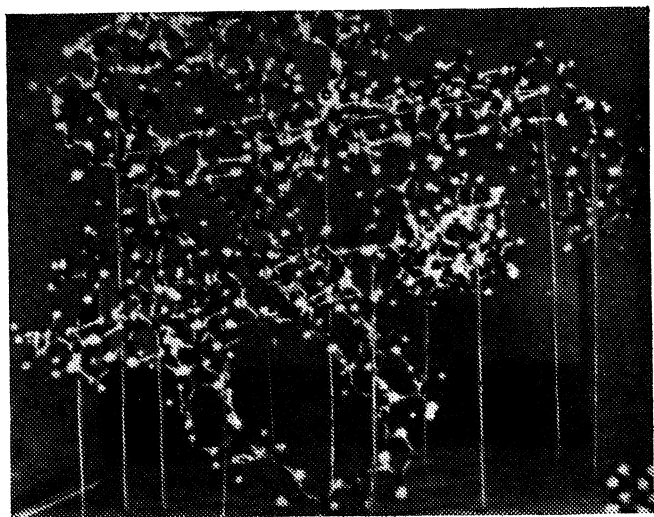


Рис. 19. Модель структуры миоглобина; внизу справа — модель структуры каменной соли, выполненная в том же масштабе.

Техника рентгеноструктурного анализа непрерывно совершенствуется. В наши дни кристаллографами разработаны программы, по которым вычислительная машина ставит кристалл на рентгеновский аппарат, управляет его съемкой, читает полученные цифры, передает их в вычислительный центр и выдает информацию о размещении атомов в структуре. Теперь уже изучены структуры нескольких десятков белков, одна другой сложнее. Но это только начало. Ведь только человеческий организм содержит около

миллиона различных белков. У каждого из них свое строение — и тайны их еще предстоит раскрывать с помощью рентгеноструктурного анализа и других современных методов исследования структуры кристаллов.

## Некристаллические (аморфные) твердые вещества

С помощью рентгеновских лучей показано, что существуют и такие твердые вещества, в которых частицы расположены в беспорядке, подобно тому, как это наблюдается в жидкости или в газе. Они называются *аморфными* веществами. Иногда их называют просто стеклами, потому что обыкновенное стекло — это самый типичный пример аморфного вещества.

Аморфные твердые вещества и жидкости занимают по своему строению промежуточное место между кристаллами и газами: расположение частиц в них гораздо менее правильно, чем в кристаллах, но все же оно не так хаотично, как в газах, в нем тоже есть некоторый порядок.

«Аморфный» — греческое слово; дословно оно означает «бесформенный»; такое название некристаллические вещества получили потому, что им от природы не свойственна многогранная форма. Не следует понимать это так, что вообще не бывает аморфных многогранников. Некристаллическому твердому телу можно придать форму многогранника. Граненые стеклянные бусы или кубики из пластмассы — многогранники, но от кристаллических многогранников они отличаются тем, что форма придана им искусственно, руками человека. Кристаллы же сами, без помощи человека, образуют свои природные многогранные формы. *Кристаллы вырастают в форме многогранников.*

Одно и то же вещество может встречаться как в кристаллическом, так и в некристаллическом виде, причем из аморфного состояния оно обычно сравнительно легко переходит в кристаллическое.

Сахарный песок — это мелкие, но очень правильные кристаллики, блестящие, прозрачные, с плоскими гранями. Кусковой сахар состоит из мелких кристалликов, спрессованных или сросшихся вместе. Изредка

в продаже, например на базарах в Средней Азии, можно встретить и большие кристаллы сахара кустарного производства.

Что произойдет, если расплавить сахар, а затем предоставить ему остывать и затвердевать? Оказывается, если расплав остывает медленно, то при его затвердевании образуются кристаллы; если же остывание происходит очень быстро, образуется аморфный сахар, леденец. Легко понять, почему это так. Представьте себе, что вам нужно построить правильными рядами беспорядочную толпу быстродвигающихся людей. Это легко сделать, если дать людям время разойтись на определенные расстояния друг от друга, проверить свое положение, выровнять ряды. Если же сразу скомандовать: «Стой!», то, конечно, никакого порядка не получится. То же происходит и при застывании расплава. В жидком расплаве частицы движутся совершенно беспорядочно. При медленном застывании они постепенно выстраиваются в ряды, в плоские сетки, трехмерные решетки — образуются кристаллы. Если же застывание происходит очень быстро, частицы не успевают расположиться правильным строем, и расплав затвердевает в виде аморфного вещества.

Образование кристаллов зависит не только от скорости застывания расплава, но и от многих других условий, например от вязкости расплава. Более вязкие расплавы чаще застывают в виде стекол, а менее вязкие, т. е. более подвижные, — в виде кристаллов. Это тоже легко понять: толпу подвижных физкультурников в спортивных костюмах проще и быстрее можно построить ровными рядами, чем толпу малоподвижных людей в шубах. Весьма подвижны, например, атомы металлов. Как бы быстро мы ни охлаждали расплавленный металл, он все-таки всегда успевает закристаллизироваться. Аморфных твердых металлов не бывает. Кристаллики, из которых состоят обычные технические металлы, очень малы и не видны простым глазом; иногда их не разглядеть даже и в микроскоп — и тогда на помощь приходят лучи Рентгена. С помощью этих лучей можно убедиться в том, что все затвердевшие металлы состоят из кристаллов. Даже ртуть, которую все привыкли видеть

жидкой, и та на сорокаградусном морозе замерзает и становится кристаллической.

В аморфном веществе частицы тоже движутся подобно тому, как в жидкости. Однако вязкость аморфного твердого тела гораздо больше, чем вязкость жидкости. Поэтому, хотя и в твердом стекле частицы могут построиться правильным строем, им нужно для этого гораздо больше времени, чем если бы они строились сразу при застывании жидкости.

На леденце, аморфном сахаре, со временем появляется рыхлая корочка. Посмотрите на нее в лупу или в микроскоп и вы убедитесь, что она состоит из крохотных кристалликов сахара: аморфный сахар начал кристаллизоваться.

Если частицам в стекле удастся в каком-то месте собраться в правильную решетку, в стеклянной массе появляются микроскопически маленькие кристаллики; постепенно они вырастают и заполняют всю массу стекла: стекло «расстекловывается». Белые звездочки кристалликов очень красивы в основной бесцветной, голубой или темнозеленой массе стекла, однако для практического использования такое стекло не годится.

С течением времени аморфные вещества перерождаются в кристаллические. Только сроки для разных веществ различны: у сахара на этот процесс идет несколько месяцев, а у камней миллионы лет. Даже наше обыкновенное оконное стекло может закристаллизоваться. Очень старое стекло в музеях иногда мутнеет, древние стеклянные вазы теряют прозрачность, потому что за сотни лет в них начинают расти массы мелких кристалликов.

Во время первой мировой войны городок Баккара во Франции, где находится знаменитый хрустальный завод, был временно оккупирован немцами. На опустевшем заводе медленно остывали громадные печи, в которых остался невыплавленный хрусталь. За двадцать дней немецкой оккупации температура печей понизилась с 1350 до 800°С. Когда после изгнания оккупантов приступили к ремонту этих печей, оказалось, что в прозрачной аморфной массе хрустального стекла выросли большие белые кристаллы.

Стекловарам издавна знакомы катастрофические случаи, когда в печи, где варится стекло, образуется

«козел» — быстро закристаллизовавшийся слиток стекла. Прочность «козла» столь велика, что подчас легче разрушить печь, чем выбить из нее засевшего «козла».

А в последние годы, исследуя кристаллическую структуру упрямых «козлов», ученые научились создавать «кристаллическое стекло», значительно более прочное, чем обычное стекло; по аналогии с кристаллом его называли «ситаллом».

### Кристаллы льда и снега

Кристаллы замерзшей воды, т. е. лед и снег, известны всем. Эти кристаллы почти полгода (а в полярных областях и круглый год) покрывают необозримые пространства Земли, лежат на вершинах гор и сползают с них ледниками, плавают айсбергами в океанах.

Ледяной покров реки, массив ледника или айсберга — это, конечно, не один большой кристалл. Плотная масса льда обычно поликристаллическая, т. е. состоит из множества отдельных кристаллов (рис. 20); их не всегда различишь, потому что они мелкие и все срослись вместе. Иногда эти кристаллы можно различить в тающем льду, например, в льдинах весеннего ледохода на реке. Тогда видно, что лед состоит как бы из «карандашиков», сросшихся вместе, как в сложенной пачке карандашей: шестигранные столбики параллельны друг другу и стоят торчком к поверхности воды; эти «карандашики» и есть кристаллики льда.

Известно, как опасны для растений весенние или осенние заморозки. Температура почвы и воздуха падает ниже нуля, подпочвенные воды и соки растений замерзают, образуя иголочки кристалликов льда. Эти острые иголки рвут нежные ткани растений, листья сморщиваются, чернеют, стебли и корни разрушаются.

После морозных ночей по утрам в лесу и в поле часто можно наблюдать, как на земле вырастает «ледяная трава». Каждый стебелек такой травы — это прозрачный шестигранный кристаллик льда. Ледяные иголочки достигают длины в 1—2 см, а иной раз

доходят до 10—12 см. Случается, что земля оказывается покрытой пластинками льда, стоящими торчком. Вырастая из земли, эти кристаллики льда поднимают на своих головках песок, гальку, камешки весом до 50—100 г. Лыдинки даже выталкивают из

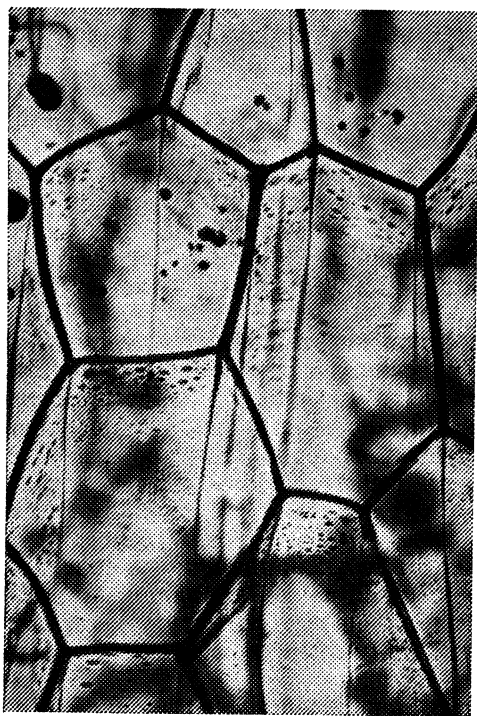


Рис. 20. Лед под микроскопом. Видны очертания сросшихся шестигранных кристалликов и пузырьки воды в тех местах, где началось таяние. Фото Г. Г. Леммлейна.

земли и уносят вверх маленькие растения. Иногда ледяная корка обволакивает растение, и корень просвечивает сквозь лед. Бывает и так, что щеточка ледяных иголок сообща поднимает тяжелый камень, сдвинуть который не под силу одному кристаллику. Искрится и горит радужным блеском хрустальная

«ледяная трава», но лишь только пригреют лучи солнца, кристаллики изгибаются навстречу солнцу, падают и быстро тают.

В морозное весеннее или осеннее утро, когда солнце еще не успело уничтожить следы ночных заморозков, деревья и кусты покрыты инеем. На ветках повисли капли льда. Вглядитесь: внутри ледяных капель видны пучки тонких шестигранных иголочек — кристалликов льда. Покрытые инеем листья кажутся щетками: как щетинки стоят на них блестящие шестигранные столбики кристаллов льда. Сказочным богатством кристаллов, хрустальным нарядом украшен лес.

Каждый отдельный кристаллик льда, каждая снежинка хрупка и мала. Часто говорят, что снег падает, как пух. Но даже это сравнение, можно сказать, слишком «тяжелое»: снежинка гораздо легче, чем пушинка. Десятки тысяч снежинок составляют вес одной копейки. Но, соединяясь в огромных количествах вместе, снежные кристаллы могут остановить поезд, образовав снежные завалы; а снежные лавины и ледники могут сдвигать и сокрушать скалы.

Прикоснитесь пальцем к снежинке, и она мгновенно растает от тепла руки. Сбросьте снежинку с рукава пальто — вы, конечно, не услышите, как она упала, а может быть, и сломалась. Но прислушайтесь, как скрипит у вас под ногами свежевыпавший снег. Что это за скрип? Это трещат и ломаются миллионы снежных кристалликов. В ясную погоду снег мерцает и искрится, «играет» на солнце. Это, как от множества крохотных зеркал, отражаются лучи солнца от плоских граней кристалликов снега.

Мелькает, вьется первый снег,  
Звездами падая на брег,

— говорит А. С. Пушкин. Звездами? Конечно, ведь каждая снежинка — шестилучевая звездочка, изредка — шестиугольная пластинка.

На снежинках легче всего убедиться в том, что форма кристаллов правильна и симметрична. Бесконечно разнообразны формы снежинок (рис. 21). Американский натуралист Бентлей больше пятидесяти лет занимался фотографированием снежинок под

микроскопом. Он составил атлас нескольких тысяч фотографий снежинок, и все эти снежинки различны, вы не найдете там ни одной пары одинаковых. Но все-таки наверняка можно сказать, что в этом атласе собраны отнюдь не все формы снежинок; можно снять еще много тысяч таких фотографий и все же не исчерпать колоссального разнообразия форм кристаллов снега.

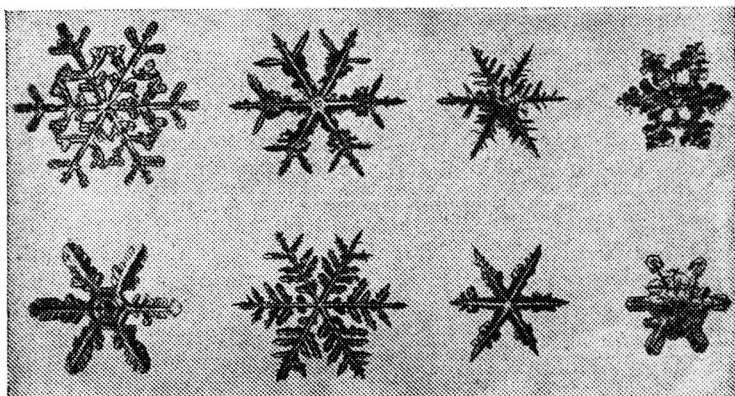


Рис. 21. Бесконечно разнообразны шестилучевые звездочки снежинок. Фото А. А. Сигсона, Рыбинск, 1872 г.

Интересно сравнить современные фотографии снежинок с рисунками (рис. 22), взятыми из старинной шведской книги «История северных народов» Олафа Магнуса. Вот наглядное свидетельство того, что люди давно уже обратили внимание на удивительные формы снежинок. Но как наивны эти рисунки четырехсотлетней давности и как мало похожи они на истинные узоры снежных кристаллов!

Увы! — приходится признать: столь же грубы и наивны бывают нередко и современные изображения снежинок. Взгляните на рис. 23. Такими, с позволения сказать, «снежинками» часто украшают рекламы, витрины, сувениры. Скользнув равнодушным взглядом, унылый рисовальщик не замечает, что восьмилучевых или пятилучевых снежинок в природе никогда



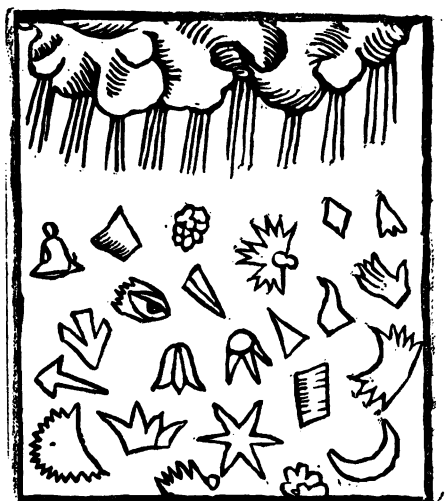


Рис. 22. Так рисовали снежинки в 1555 г.

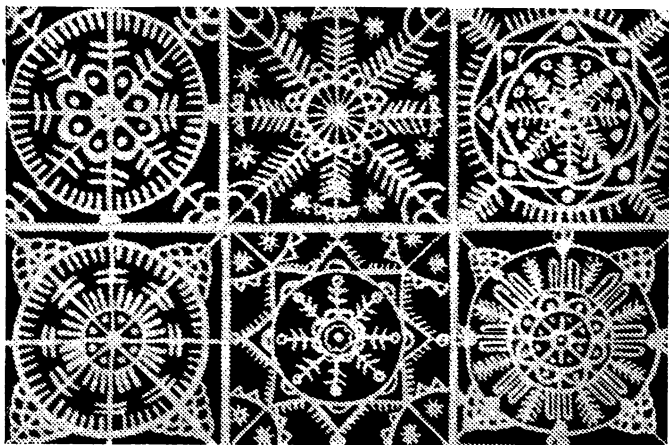


Рис. 23. Таких снежинок не бывает!

не бывает и быть не может. Чтобы убедиться в этом, не надо перелистывать атлас Бентлея. Посмотрите сами внимательно — так, как посмотрел талантливый



— Все подходят, не первый взгляд...  
Трудно выбрать... Реализуем все...

Рис. 24. Миф о создании снежинок. Из книги Жана Эффеля «Сотворение мира и человека».

художник Жан Эффель, изображая «первое производство снежинок» в забавной серии «Сотворение мира» (рис. 24). Удивительно разнообразны формы звездочек-снежинок, но симметрия их всегда одинакова: только шесть лучей. Почему? Такова симметрия атомной структуры кристаллов снега. Это относится

не только к снегу. Формы кристаллов могут быть весьма разнообразными, но симметрия этих форм для каждого вещества одна, ее определяет симметрия и закономерность атомного строения данного вещества. Снежинка может быть только шестилучевой — такова симметрия строения кристаллов снега.

### О драгоценных камнях

С самых ранних времен человеческой культуры люди ценили красоту драгоценных камней. Алмаз, рубин, сапфир и изумруд — самые дорогие и излюбленные камни. За ними следуют александрит, топаз, шпинель, горный хрусталь, аметист, гранат, аквамарин, хризолит. Высоко ценятся небесно-голубая бирюза, нежный жемчуг и переливчатый опал. В этих трех минералах можно обнаружить лишь скрытно-кристаллическое строение.

Драгоценным камням издавна приписывали целебные и разные сверхъестественные свойства, связывая с ними многочисленные легенды. Драгоценные камни служили мерой богатств князей и императоров. Но тяжелой ценой доставались эти сокровища. Сотни и тысячи нищих, полуголодных тружеников погибали, добывая самоцветы. История драгоценного камня в странах капитала — это повесть об угнетении, эксплуатации и голоде, об обманах и убийствах. Вот одна из таких историй.

Громадный алмаз «Регент» \*) был найден негром-невольником, работавшим на алмазных рудниках в Южной Африке. В каторжных условиях жили невольники на этих рудниках: они были заключенными, и стража охраняла их, чтобы ни один алмаз не ушел из рук хозяев. А если невольнику разрешали в свободный день выйти за пределы рудника, то его не только обыскивали с головы до ног, но даже заставляли заранее принять касторку, чтобы он не мог спрятать алмаз, проглотив его. Невольник, нашедший «Регент», все же скрыл свою находку от надсмотрщика: глубоко разрезав себе ногу, он спрятал сокровище в

---

\*) Самые большие в мире алмазы известны каждый под своим названием, например «Орлов», «Шах», «Коннур», «Африканская звезда», «Регент».

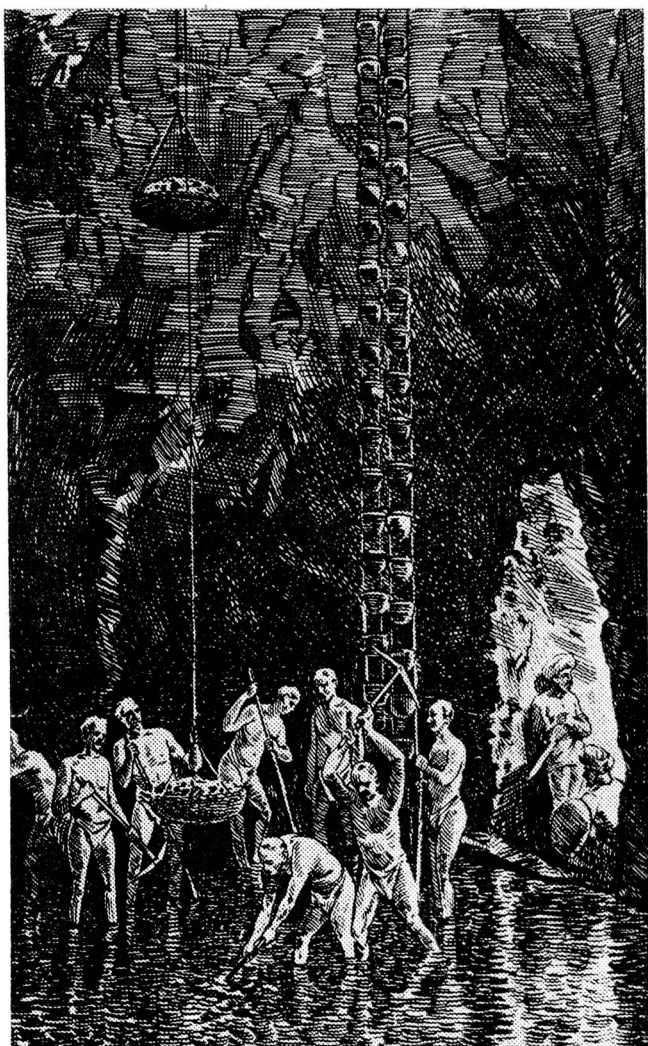


Рис. 25. Алмазная копь в Индии в конце XIX в.

ране под повязкой. Он открыл свою тайну одному матросу, умоляя помочь ему бежать. Матрос устроил ему побег, а на корабле, отняв у него алмаз, столкнул невольника в море. Сам матрос продал камень за бесценок и, быстро промотав деньги, с отчаяния повесился. Переходя из рук в руки, алмаз этот попал в сокровищницу королей Франции. Впоследствии Наполеон I носил его на рукоятке своей шпаги, суеверно считая, что этот алмаз приносит ему счастье. В середине XIX в., когда французское правительство продавало часть своих коронных сокровищ с аукциона, «Регент» был оценен в шесть миллионов франков.

В музеях московского Кремля можно любоваться богатой коллекцией драгоценных камней, некогда принадлежавших царской семье и небольшой кучке богачей.

Иноземные послы, побывавшие в XVII в. в России, писали, что ими овладел «тихий ужас» при виде роскошных нарядов царской семьи, сплошь унизанных драгоценными камнями. На голове царицы Ирины Годуновой была корона, «как стена с зубцами», разделенная на 12 башенок, искусно выделанных из рубинов, топазов, алмазов и «скатных» жемчугов», а кругом корона была унизана огромными аметистами и сапфирами. С обеих сторон ниспадали тройные, длинные цепи из больших изумрудов. Вся одежда царицы тоже была пышно изукрашена несметным количеством самоцветов.

Известно, что шляпа князя Потемкина-Таврического так была усеяна бриллиантами и из-за этого столь тяжела, что владелец не мог носить ее на голове; адъютант нес шляпу в руках за князем.

На одном из платьев императрицы Елизаветы было нашито столько драгоценных камней, что императрица, не выдержав их тяжести, упала на балу в обморок. Впрочем, еще раньше с супругой царя Алексея Михайловича случилось более досадное происшествие: ей пришлось прервать обряд венчания, чтобы снять с себя усыпанный самоцветами наряд, тяжесть которого оказалась ей не под силу.

Императрица Екатерина II, играя в карты, любила расплачиваться бриллиантами. «Как весело играть в бриллианты! Это похоже на тысячу и одну ночь!» —

воскликала Екатерина в одном из писем. Она подарила своему любимцу Орлову наряд, украшенный алмазами стоимостью в миллион рублей. Орлов не остался в долгу: он преподнес императрице знаменитый алмаз, который с тех пор украшал скипетр русских царей (рис. 26).

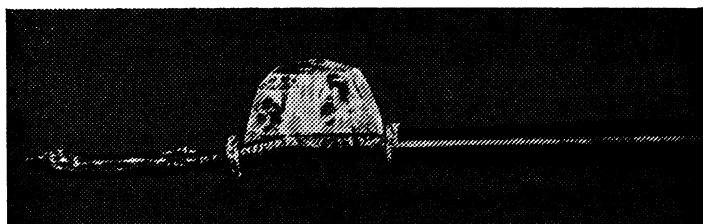


Рис. 26. Алмаз «Орлов» в скипетре русских царей.

В числе сокровищ алмазного фонда Советского Союза хранится один из величайших и красивейших в мире алмазов «Шах» (рис. 27). На полированной поверхности этого чудесного камня замысловатой персидской вязью выгравированы имена его владельцев, начиная с 1591 г. Алмаз был прислан персидским шахом русскому царю Николаю I в качестве выкупа за убийство русского посла Александра Сергеевича Грибоедова, автора гениальной комедии «Горе от ума». Жизнь одного из величайших наших писателей была приравнена к стоимости камня. Царь не возражал: камень-то молчит!

Ныне алмаз «Шах» соседствует в витрине с советскими алмазами из Якутии.

В Государственном Эрмитаже в Ленинграде выставлена единственная в мире мозаичная карта Советского Союза: 27 квадратных метров этой карты сплошь выложены драгоценными и полудрагоценными камнями.

Наша Родина богаче самоцветами, чем какая-либо другая страна в мире. Урал, Алтай, Сибирь и другие области необъятной страны Советов таят в своих недрах прекрасные алмазы, темно-синие сапфиры,

нежно-голубые аквамарины, зеленые изумруды, фиолетово-красные, золотистые и голубые топазы, лиловые аметисты, небесно-голубые эвклазы, желтоватые фенакиты, золотисто-желтые хризолиты, переливчатые жемчуга... Нет возможности даже перечислить их.

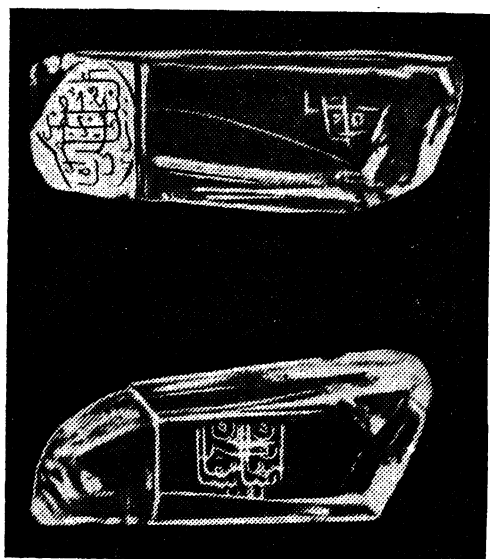


Рис. 27. Алмаз «Шах» — плата за жизнь А. С. Грибоедова.  
Вид сбоку и сверху.

Древнее мастерство русских гранильщиков, художников камня, возрождается и широко применяется в искусстве советского народа. Кремлевский Дворец съездов, подземные чертоги московского метро, залы театров, клубов, дворцов, павильоны ВДНХ одеваются нарядным поделочным камнем. Наконец-то может мастер по камню «полную силу камня самому поглядеть и людям показать» \*).

Непревзойденный знаток драгоценного и цветного камня академик А. Е. Ферсман писал в одной из своих

\*) П. Бажов, Сказ «Каменный цветок» из сб. «Малахитовая шкатулка».

последних книг: «Камень сейчас в руках человека — не забава и роскошь, а прекрасный материал, которому мы сумеем вернуть его место, материал, среди которого прекраснее и веселее жить. Он не будет «драгоценным камнем» — его время прошло: это будет самоцвет, дающий красоту жизни.

Надо перестать смотреть на самоцвет, как на элемент богатства, роскоши, тщеславного самоукрашения. В этой роли он выступал еще недавно, вместе с бумажками, акциями и купонами, сменив золото и серебро.

В культуре будущего, идущей по новым путям, камень как прекрасный материал природы войдет в повседневную жизнь. В нем человек будет видеть воплощение непревзойденных красок и нетленности самой природы, к которым может прикоснуться только горящий огнем вдохновения художник».

### Сказки о кристаллах

С давних пор обратили люди внимание на сходство кристаллов горного хрусталя и кристаллов льда: и те, и другие — бесцветные, прозрачные шестигранные «карандашики» с острыми пирамидками на концах. Не мудрено, что в древности и в средние века полагали, что кристаллы горного хрусталя и льда — это одно и то же, только лед замерзает у нас на глазах, а горный хрусталь — лишь при особенно сильном морозе. Само слово «кристалл» происходит от греческого «крюсталлос» — лед.

— Ныне скажи мне, кристалл, окаменевшая влага, кто заковал тебя?

— Стужа.

— Кто раскует тебя?

— Жар,

— писал римский поэт Клавдиан в IV веке н. э. \*).

В многотомной «Естественной истории» римского ученого Плиния Старшего (I в. н. э.), энциклопедии древнего мира, которую на русский язык перевел замечательный минералог XVIII в. В. М. Севергин, мы находим сведения о горном хрустале. Плиний ут-

---

\*) Перевод И. И. Шафрановского.



верждает, что он «образуется действием сильного холода... По крайней мере оный только там находится, где наиболее смерзается зимних снегов. А что он есть лед — сие достоверно».

В романе Виктора Гюго «Человек, который смеется» в сцене суда над Урсом показано, как опасно было спорить с официальным представителем медицины XVII в., который утверждал: «Доказано, что хрусталь — это продукт естественной возгонки льда

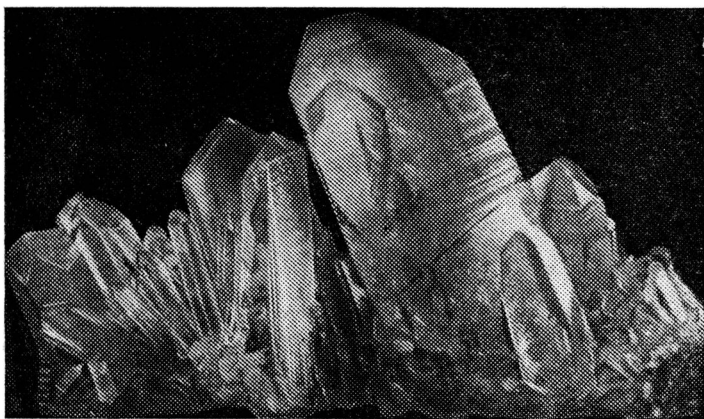


Рис. 28. Кристаллы горного хрусталя.

и что алмаз — результат такой же возгонки хрусталя; установлено, что лед становится хрусталем через тысячу лет и что хрусталь становится алмазом через тысячу веков».

В древности кристаллам приписывали всякие необыкновенные свойства. Считали, что кристалл аметиста предохраняет от пьянства и навевает счастливые сны, изумруд спасает мореплавателей от бурь, сапфир помогает при укусах скорпионов, алмаз бережет от болезней, топаз приносит счастье в ноябре, а гранат — в январе, и т. д. Человека, укушенного змеей, заставляли есть толченый изумруд. Древние обитатели Америки — инки — поклонялись как боже-  
ству большому кристаллу зеленого изумруда.

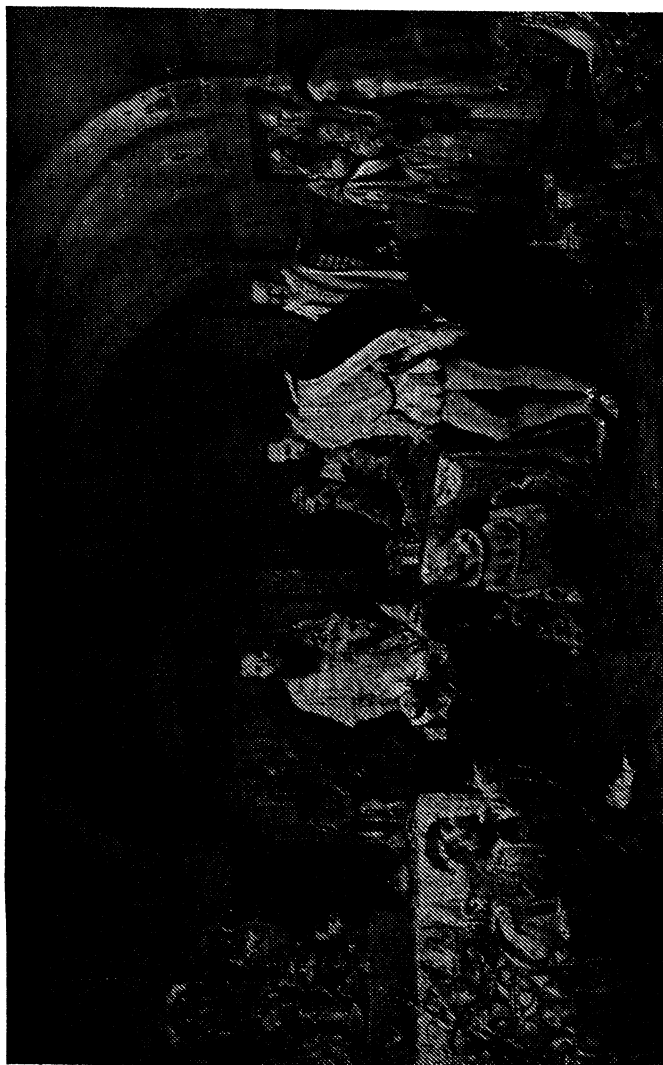


Рис. 29. Иван Грозный показывает свои сокровища англичанину Горсею. Картина А. Д. Литовченко. Государственный Русский Музей, Ленинград.

Англичанин Горсей, посетивший Москву в XVI в., рассказал в своих записках, как царь Иван Грозный показывал ему свои драгоценные камни (рис. 29).

«Посмотрите на этот чудесный коралл и на эту бирюзу,— говорил Грозный Горсею,— возьмите их: они сохраняют природную яркость своего цвета; положите их теперь ко мне на руку, я заражен болезнью; смотрите, как они тускнеют; это предвещание моей смерти. Смотрите на эти драгоценные камни.

Вот алмаз, блеском он дороже и ценнее всех прочих. Никогда я не любил его, он укрощает ярость и сластолюбие, дает воздержание и целомудрие. Лошадь, не то что человек, умрет от малейшей частицы его, истертой в порошок и данной в питье.

Вот рубин: он врачует сердце, мозг и память человека».

А вот какие свойства приписывает драгоценным камням русский лечебник начала XVIII в.:

«Морион камень кто на шее носит, тот не будет страдать меланхолией, и если имеет падучую болезнь, то выздоровеет.

Если воин на левой стороне в оружии своем носит алмаз, то не будет убит; алмаз же, носимый в перстне на руке, лихие сны отгоняет и приносит пользу беснующимся и лунатикам.

Яхонт красный кто при себе носит, страшных лихих снов не увидит, укрепит свое сердце и в людях честен будет.

Яхонт лазоревый кто при себе носит, тело умножает и чинит человека быть чистым и добрым, нечистоту с очей и болезни с тела отгоняет, а кто его в перстне при себе носит, чинит его спокойным и в людях честным, набожным и милостивым \*).

Изумруд еще \*\*) в питье положить, уймёт смертоносную ярость, к укушению ядовитых змей уздавляет; изумруд толчен и принят во внутрь в питии от окорму смертельного избавляет человека.

Аще кто на изумруд часто зрит, тогда зрак \*\*\*) человеческого укрепит, очи от недугов во здравии

---

\*) Морион камень — дымчатый горный хрусталь, яхонт красный — рубин, яхонт лазоревый — сапфир.

\*\*) Аще — если.

\*\*\*) Зрак — глаз.

сохраняет и носящему его весельство наводит. Тот же камень толчен и в питии принят пользует прокаженных, печени и желудку помогает».

И сейчас еще часто люди, рассматривая чудесные, сверкающие, переливающиеся многогранники кристаллов, не хотят верить, что они созданы природой,

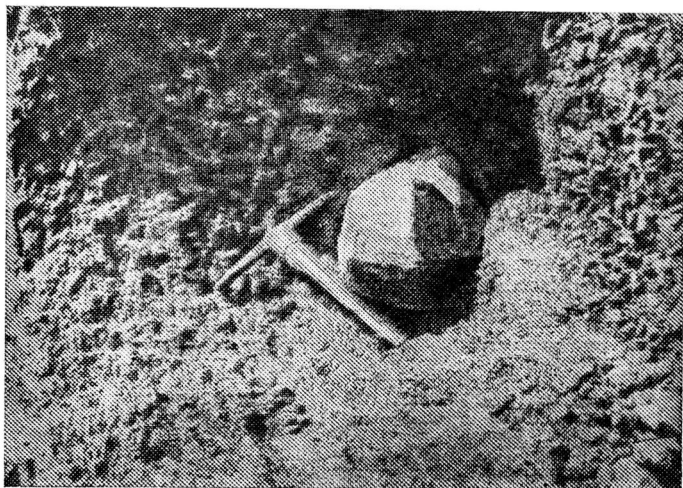


Рис. 30. Кристалл горного хрусталя в земле. Житомирская область СССР.

а не человеком. Но теперь мы можем проследить образование кристаллов на опыте.

Считать, что кристаллы сделаны человеком, могли те, кто не видел кристаллов в природе. Но искатели камней, рудокопы, находившие кристаллы в земле (рис. 30), понимали, что человек тут не при чем. В то же время им трудно было поверить, что кристаллы образуются сами; это казалось слишком странным.

Так родились народные сказания о кристаллах. В глубинах гор, — рассказывали уральские искатели камня, — живет «Хозяйка Медной горы». Под землей у нее палаты каменные, а стены — из дорогих самоцветов. Деревья в горе каменные, каменные листья и сучки постукивают. На кустах — зеленые колокольцы

малахитовые и в каждом — сурьмяная звездочка. Трава тоже каменная, а цветы из камней узорных, и пчелки золотые, как искорки, над теми цветами.

Не захочет Хозяйка показать человеку горные богатства — обманут, закружат его зеленые ящерки, уведет золото Змей — Великий Полоз. И лишь редким счастливым сама Хозяйка поможет найти самоцветы. А когда случилось заплакать Хозяйке — «она это руку подставила, а слезы кап-кап и на руке зернышками застывают. Полнехонька горсть... Камешки холодные, а рука, слышь-ко, горячая, как есть живая...».

Много таких легенд, рассказанных старыми уральскими мастерами и рудознатцами, собрал писатель П. Бажов в сборнике «Малахитовая шкатулка».

Непревзойденный знаток и любитель камня академик Александр Евгеньевич Ферсман в поэтичных «Воспоминаниях о камне» пересказал несколько народных легенд о самоцветах: вишнево-красный эвдиалит Хибинских тундр — это капли крови вольнолюбивого народа саамов, бившихся за свою свободу; черные головки на розовых кристаллах итальянского турмалина выросли в знак траура, когда богатч отобрал у крестьянского парня найденную им турмалиновую копь. Богатч «...привез машины, нанял много рабочих, разворотил, как видишь, целую гору, но розовых турмалинов с розовой головкой больше не было. А вместо них... выросли на турмалинах черные головки, знаешь, эти мохнатые, некрасивые камни с черными, траурными головками... А розовых камней так больше и не было».

Не одну красивую сказку о кристаллах можно найти в сокровищницах народной поэзии.

Но как же в действительности образуются кристаллы?

Все кристаллы, окружающие нас, не образовались когда-то раз и навсегда готовыми, а выросли постепенно. В природе, в лаборатории, на заводе кристаллы растут из растворов, из расплавов, из паров, из твердых веществ.

Посмотрим же, как растут и живут кристаллы.

## Глава 2

### КАК РАСТУТ ПРИРОДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Велико есть дело достигать во глубину земную разумом, куда рукам и оку досягнуть возбуждает натура; страствовать размышлениями в преисподней, проникать рассуждениями сквозь темные расселины и вечною ночью помраченные вещи и деяния выводить на солнечную ясность,

М. В. Ломоносов,  
«О слоях земных»

#### Земля живет

Земная кора, т. е. та твердая, каменная оболочка Земли, на которой мы живем, — это сравнительно тоненькая корочка на поверхности нашей планеты.

Твердая земная кора, как панцирем, охватывает горячий океан — область магмы, т. е. расплавленной каменной массы, насыщенной различными горячими газами и перегретыми парами воды. В области магмы господствуют очень высокие температуры и колоссальные давления: земная кора — это застывшая твердая магма. Она образовалась при застывании магмы, как пенка на молоке. Все минералы и горные породы Земли в конечном счете родились из магмы.

Химические элементы находятся в магме в состоянии соединений, как бы растворенных друг в друге. Температура и давление внутри магмы, а значит, и содержание в ней газов и паров и ее химический состав не остаются неизменными. Если магма поднимается из глубин к поверхности Земли, то условия меняются, температура падает, давление понижается, и магма начинает застывать, образуя твердые мине-

ралы и горные породы, почти всегда кристаллические.

При застывании в магме происходят сложные физико-механические процессы, в результате которых она распадается на ряд химических соединений. Одни соединения затвердевают раньше, другие позже, поэтому магма разделяется на участки, образуя различные горные породы.

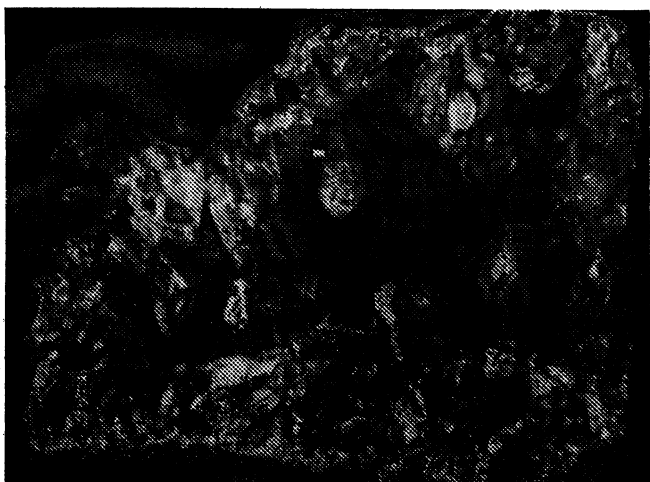


Рис. 31. «Хрустальный погреб» с кристаллами голубого целестина. Река Пилега.

В оставшейся расплавленной массе накапливаются пары воды и летучие соединения. Эти части магмы заполняют трещины земной коры, медленно застывают там и образуют минералы. Часть летучих соединений поднимается выше, к земной поверхности, в виде газовых струй, а водяные пары сгущаются в воду, образуя растворы остатков магмы. Эти растворы текут по трещинам, постепенно охлаждаясь и выделяя один за другим различные минералы, оседающие по стенкам трещин; так возникают минеральные «жилы».

Горячие водные потоки, встречаясь с горными породами и минералами, растворяют некоторые из них и дают начало новым химическим соединениям: при этом возникают все новые и новые минералы. Достигнув земной поверхности, водные источники вливаются в ручьи, реки, моря, океаны, а летучие соединения — пары и газы — в атмосферу. Этим не ограничивается жизнь Земли. Жара и мороз, солнце, ветер, вода разрушают минералы, слагающие земную кору, камни растрескиваются от смены тепла и холода, обрушиваются, рассыпаются, ветер рассеивает и разносит мельчайшие обломки; вода обтачивает и разъедает камни, уносит в себе их составные части. Кварц — один из самых распространенных на земле минералов — рассыпается на мелкие зерна, образуя песок; полевые шпаты превращаются в глину. Реки растворяют минералы, уносят их в море. Слой за слоем оседают растворенные вещества на дне озер, морей, океанов, образуя новые толщи пород. Их закрывают новые слои, и они оказываются опять не на поверхности, а в глубине Земли; а там их снова растворяют подземные воды, снова соприкасается с ними магма, вновь расплавляются, разлагаются и затвердевают они, большей частью в кристаллической форме. «Такие перемены,— говорит М. В. Ломоносов,— произошли не за один раз, но случились в разные времена несчетным множеством крат и ныне происходят, и едва ли когда перестанут».

Так совершается круговорот вещества на нашей планете, которая кажется нам неизменной лишь потому, что все эти процессы происходят настолько медленно, что мы не можем их заметить.

Мы привыкли считать камни неизменными, но на самом деле камни рождаются, живут, стареют, разрушаются и снова возрождаются в виде новых камней. Один из первых русских минералогов, академик В. М. Севергин, в книге «Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел», изданной в 1798 г., говорит о жизни камней: «Минералы подвержены общему с прочими вещами жребию; все повинуетя времени: все должно родиться,





Рис. 32. Это не снежные горные вершины. Это поверхность халцедона с паросшими на него мелкими кристалликами горного хрусталя (а); то же, но с увеличением в 40 раз (б).  
Фото Г. Г. Леммлейна.

быть и умереть, и все обращается паки \*) в тот безмерный Океан, откуда оно произведено было, так что хотя подземное богатство, с одной стороны, безмерно истощается, однако с другой — оно через разрушение всех тел в природе, вероятно, паки обогащается.

Каменные вещи долгою времени выветриваются и распадаются; металлические сосуды, истуканы и другие изделия тускнеют и ржавеют. Сколь бесчисленное множество таковых искусственных вещей от создания мира выветрилось, распалось, заржавело и прочее. Воздух и вода таковые частицы потом принимают в себя и увлекают их с собой в разные места, употребляя их, вероятно, для образования новых тел в природе».

### Как образуются расплавы

Застывание магмы — это процесс роста кристаллов из расплавов. При нагревании твердые вещества расплавляются (если, конечно, они не сгорают или не разлагаются на составные части). Но оказывается, что кристаллы и аморфные вещества (стекла) плавятся совсем по-разному.

Каждое кристаллическое вещество начинает плавиться при совершенно определенной температуре. Нагреем, например, кристалл олова и будем при этом измерять температуру: 100, 200, 225 °C — кристалл не меняется. Вдруг при 231,9 °C кристалл сразу начинает плавиться. Сколько бы раз мы ни повторяли этот опыт, нам не удастся расплавить кристалл олова при 231 °C или более низкой температуре и, наоборот, нам не удастся сохранить его при 232 °C или более высокой температуре: он обязательно начнет плавиться при 231,9 °C, если только опыт производится при атмосферном давлении, если в олове нет примесей и если нет явления переохлаждения, о котором речь пойдет ниже.

Будем продолжать нагревать плавящийся кристалл олова. Несмотря на нагревание, температура олова больше не повышается: во все время плавления она остается равной 231,9 °C. И только когда

---

\*) Паки — снова, опять.

плавление закончится, температура олова — теперь уже не кристалла, а жидкого расплава — начнет повышаться, — если, конечно, продолжать нагревание.

Все кристаллы плавятся при определенной температуре, называемой температурой плавления. При этой температуре разрушается кристаллическая структура, распадается правильный строй частиц, подобно тому как рассыпается строй физкультурников по команде «Разойтись!». Для всех кристаллов одного и того же вещества при постоянных условиях температура плавления одинакова, а для разных веществ она различна. Кристалл каменной соли начинает плавиться точно при  $804^{\circ}\text{C}$ , кристалл кварца — при  $1470^{\circ}\text{C}$ . Все кристаллы во время плавления сохраняют постоянную температуру. Именно на этом свойстве кристаллов основано устройство термометра. Нуль градусов по стоградусной шкале термометра — это температура, при которой в обычных условиях тают, т. е. плавятся, кристаллы льда.

А как же плавятся некристаллические твердые тела? Нагревая какое-либо аморфное вещество, например простое стекло, мы уже не сумеем точно определить температуру его плавления, потому что

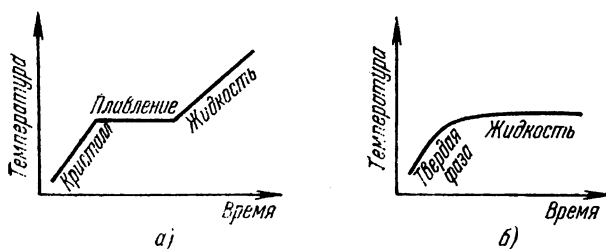


Рис. 33. Так меняется температура при нагревании кристалла (а) и аморфного вещества (б).

аморфное вещество расплавляется постепенно: в процессе нагревания оно размягчается, становится все менее и менее вязким и в конце концов совсем жидким (рис. 33). Это и понятно: ведь тут не нужно никакой команды, чтобы нарушить строй, так как в стекле все частицы уже и до нагревания расположены беспорядочно.

Если бы стекло плавилось сразу, как кристалл, невозможно было бы выдувать и формовать из него посуду. Лишь благодаря тому, что стекло размягчается или застывает постепенно, стеклодув может выдувать и лепить его, придавая ему любую форму.

Наличие постоянной температуры плавления отличает кристаллические тела от некристаллических. Кристаллы начинают плавиться сразу при определенной температуре, а некристаллические, аморфные вещества (и смеси многих кристаллических веществ) размягчаются постепенно: у них нет определенной температуры плавления. Лед, например, начинает таять точно при нуле градусов, значит лед — это вещество кристаллическое, а смола, асфальт, пластмассы, желатин, вар, столярный клей размягчаются постепенно — значит, эти вещества не кристаллические, а аморфные.

Но всегда ли одинакова температура плавления кристаллов одного и того же вещества? Нельзя ли изменить ее? Оказывается, можно. Дело в том, что температура плавления кристалла зависит от давления, под которым этот кристалл находится (рис. 34).

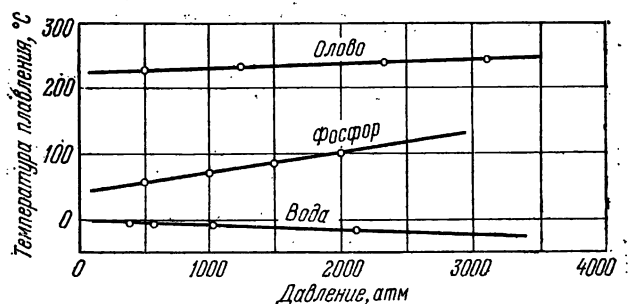


Рис. 34. Зависимость температуры плавления некоторых веществ от давления.

Например, лед тает, т. е. плавится, при  $0^{\circ}\text{C}$  лишь при нормальном давлении (в одну атмосферу). Если же давление повышать, то лед может растаять и при более низкой температуре, уже при нескольких градусах мороза. При давлении в 100 атмосфер лед тает при  $-0,9^{\circ}\text{C}$ , а если давление в полторы тысячи

раз больше атмосферного, лед растает уже при  $-14,1^{\circ}\text{C}$ .

В опытах с колоссальными давлениями вплоть до десятков тысяч атмосфер удалось менять температуры плавления кристаллов даже на сотни градусов. Например, если повысить давление до 12 тысяч атмосфер, то температура плавления кристаллов калия повысится с  $62$  до  $179^{\circ}\text{C}$ , а у кристаллов анилина она возрастет еще сильнее: чтобы расплавить под таким давлением кристалл анилина, его придется нагревать до  $199^{\circ}\text{C}$ , тогда как при атмосферном давлении он плавится уже при  $-6^{\circ}\text{C}$ . А вот у кристаллов висмута при таком же повышении давления температура плавления не увеличится, а уменьшится: для плавления достаточно будет нагреть кристалл висмута до  $218^{\circ}\text{C}$ , между тем как в нормальных условиях он плавится при  $271^{\circ}\text{C}$ .

Давление влияет на температуру плавления всех кристаллов, но влияние это для разных веществ различно: у одних оно сильнее, у других слабее; у некоторых веществ при повышении давления температура плавления возрастает, а у иных, наоборот, понижается. Это особенно сказывается в глубине Земли, где действуют давления в миллионы раз большие, чем на ее поверхности. Поэтому в недрах Земли кристаллы плавятся при иных температурах, чем в лабораториях. Но и там кристаллы начинают плавиться обязательно при определенной температуре, только температура эта — особая для каждой области давления.

На температуру плавления влияют, кроме давления, еще и другие причины, например примеси иных веществ в расплаве. Так, температуры плавления чистого железа и чистого кремния очень высоки, а смесь окислов этих элементов с известью плавится при гораздо более низкой температуре. На этом основан способ выплавки железа из руд, содержащих кремнезем. В рудную смесь добавляют известняк; кремнезем, известь и небольшая доля железа образуют легкоплавкий шлак, который всплывает и отделяется от более тугоплавкого чистого железа.

Если добавить ко льду обыкновенную столовую соль, температура таяния льда повысится. Этим

широко пользуются дворники на улицах больших городов: чтобы легче было убрать лед с тротуаров, они посыпают его солью.

### Как кристаллы растут из расплавов

Если нагреть кристалл до температуры плавления, то он начнет плавиться. Ну, а что получится, если медленно охлаждать жидкий расплав до той же температуры? Ясно, что, охладившись до температуры плавления, жидкий расплав начнет кристаллизоваться. Нагрейте чистый лед при атмосферном давлении до  $0^{\circ}\text{C}$  — он растает, т. е. расплавится и превратится в воду. Наоборот, охладите чистую воду до  $0^{\circ}\text{C}$  — она замерзнет, превратится в кристаллы льда. При нагревании до нуля градусов рассыпается строй частиц, разрушается кристаллическая структура льда. А при остывании до нуля градусов беспорядочно толпящиеся частички начинают собираться правильным строем: среди хаоса возникают зародыши кристаллической структуры. Значит, температура плавления кристаллов данного вещества является в то же время и *температурой кристаллизации* его расплава.

Как же растут кристаллы в расплаве?

В массе застывающего расплава образуется сразу много кристаллических зародышей; все они одновременно вырастают в маленькие кристаллики. Пока эти кристаллики совсем малы, они растут свободно, каждый — правильным многогранником. Но, увеличиваясь, кристаллы встречаются и начинают мешать друг другу. Как только два растущих кристалла встретятся друг с другом, рост обоих кристаллов в этом месте прекращается: ведь ни один из них не может отодвинуться. С других же сторон — там, где кристаллы еще не столкнулись с соседями, — они продолжают расти. Так получается, что кристалл вырастает в одну сторону больше, чем в другие: образуются не правильные многогранники, а кристаллические зерна, из которых сложены горные породы. Или же, в конце концов, после упорной «борьбы» выживают отдельные кристаллики. На рис. 35, снятом в электронном микроскопе с увеличением в 2000 раз, видно, как из множества мелких росших

вместе и теснивших друг друга кристаллов выделились отдельные крупные кристаллы.

Название самой распространенной, всем известной горной породы, гранита, происходит от латинского слова «гранум», т. е. «зерно». В граните легко различить простым глазом зерна дымчатого или бесцветного кварца, розового, серого, лилового полевого шпата, блестящие чешуйки слюды (рис. 36).

Так же застывает расплавленный металл. Заводской металл тоже является поликристаллом, т. е. состоит из многих монокристаллических зерен; среди этих зерен не встретишь правильных, симметричных многогранников: формы всех кристаллических зерен металла обычно совершенно неправильны.

Почему же мы все-таки говорим, что характерным свойством кристаллов является их многогранная форма? Прежде всего потому, что если бы это же самое кристаллическое зерно росло не в тесноте, а так, чтобы ему ничто не мешало, то оно непременно приобрело бы форму правильного многогранника. Кривая, не многогранная форма — это не естественная, а вынужденная форма кристалла: ему пришлось принять ее потому, что не было ни места, ни материала для образования настоящей правильной формы, свойственной



Рис. 35. В борьбе многих мелких кристалликов кварца выжили крупные кристаллы. Фото В. И. Солюшкина.

всем кристаллам, растущим без помехи. Дайте этому кристаллу расти свободно — и перед вами снова возникнет правильный симметричный многогранник.

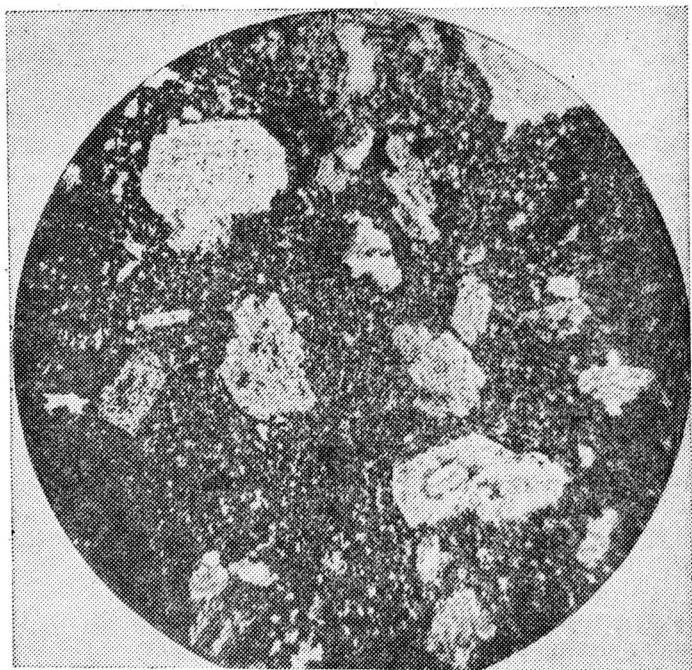


Рис. 36 Большие кристаллические зерна в мелкокристаллической горной породе Увеличено в 60 раз

А главное — потому, что внутреннее строение, правильность, периодичность, симметрия расположения атомов не изменились от того, что нарушилась форма.

### Как кристаллизуется магма

Более 95% всех горных пород, из которых сложена земная кора, образовались непосредственно при кристаллизации природного расплава, т. е. магмы. Кристаллизация магмы — явление очень сложное.



Магма представляет собой смесь многих веществ. У всех этих веществ разные температуры кристаллизации, к тому же температура кристаллизации каждого вещества меняется в зависимости от того, в каких условиях находится магма в данный момент, и от того, какие еще вещества присутствуют в ней. Поэтому при остывании и затвердевании магма разделяется на части: первыми в магме возникают и начинают расти кристаллы того вещества, у которого температура кристаллизации самая высокая. Обычно получается так, что это вещество еще не успеет выделиться полностью, а магма уже остыла до температуры кристаллизации второго минерала, и он тоже начинает выделяться в виде кристаллов; одно за другим, поочередно или вместе, влияя друг на друга, начинают кристаллизоваться и остальные вещества, между тем как ранее образовавшиеся кристаллы тоже продолжают расти. Наконец, разделившись на разнородные участки, вся магма затвердевает. Так образуются горные породы.

Чем медленнее застывает магма, тем больше успевают вырасти кристаллические зерна составляющих ее минералов. Поэтому при медленном застывании магмы образуются крупнозернистые горные породы, а при быстром — мелкозернистые; впрочем, величина кристалликов зависит еще и от многих других причин, в свою очередь влияющих друг на друга.

Если магма застывает не постепенно, а внезапно, то, как и при всяком резком охлаждении расплава, могут образоваться некристаллические минералы или горные породы. Внезапное застывание магмы можно наблюдать при извержении вулкана, когда из недр Земли на поверхность вырывается горячая магма — лава. Потоки застывшей лавы на склонах вулканов дают начало не кристаллическим, а стекловидным горным породам, так называемым вулканическим стеклам. Таково, например, происхождение залежей минерала обсидиана на Кавказе.

В застывающей магме иногда образуются трещины, каналы, пустоты, как пузыри в хорошо пропеченном хлебе. Уральские камнеискатели называли эти пустоты «погребями» или «занорышами», а минералогии — «жеодами» (рис. 37). Ничто не мешает

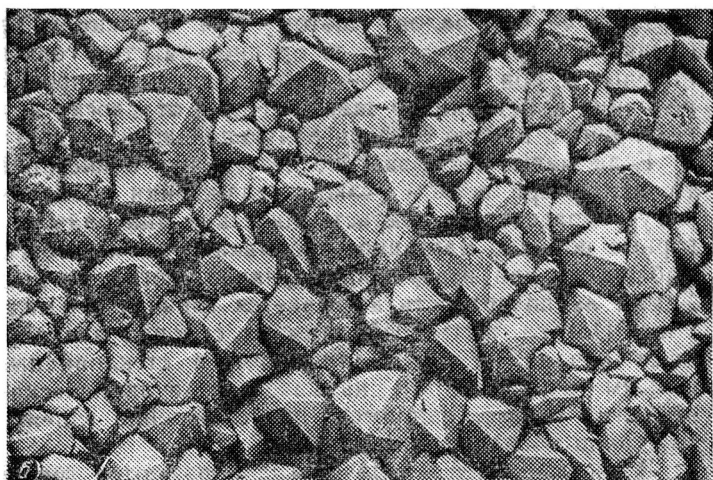
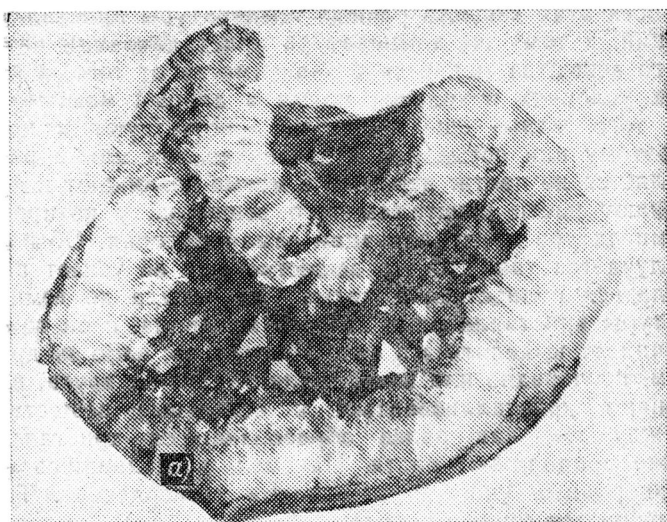


Рис. 37. Жеода с кристаллами аметиста (а) и участок той же жеоды, увеличенный в 30 раз (б).

здесь росту кристаллов, поэтому в занорышах вырастают великолепные многогранники, иногда достигающие грандиозных размеров, например кристаллы горного хрусталя весом до полутора тонн, длиной до 1,5 — 2 метров, кристаллы полевого шпата весом до ста тонн с площадью граней в несколько десятков



Рис. 38. Самый большой кристалл берилла в СССР. Геологический музей им. Чернышева, Ленинград.

квадратных метров. Летучие пары соединений борного ангидрида дают минерал турмалин, чьи трехгранные призмы иногда представляют собой настоящие колонны длиной до 2—3 метров. Из соединений фтора возникает драгоценный минерал топаз, крупнейшие образцы которого весят десятки килограммов. Соединения бериллия выкристаллизовываются в виде голубых аквамаринов, густо-зеленых изумрудов, желтовато-зеленых бериллов \*) длиной до 5 метров (рис. 38).

---

\*) Аквамарин и изумруд — разновидности одного минерала, берилла, различающиеся только по цвету, который зависит от химических примесей. Аквамарин — голубовато-зеленый берилл цвета морской волны (латинск. aqua marina означает «морская вода»), изумруд — зеленый берилл.

Модель «хрустального погреба» с кристаллами можно увидеть не в земле, а... в конфетах с сахарным сиропом (драже, шоколадные конфеты с ромом). Раскусите такую конфету, и вы увидите, что на стенках ее внутренней полости осели маленькие, хорошо ограненные кристаллики сахара, которые выросли из остывшего сахарного сиропа совершенно так же, как вырастают большие и малые природные кристаллы на стенках трещин и пустот в земной коре.

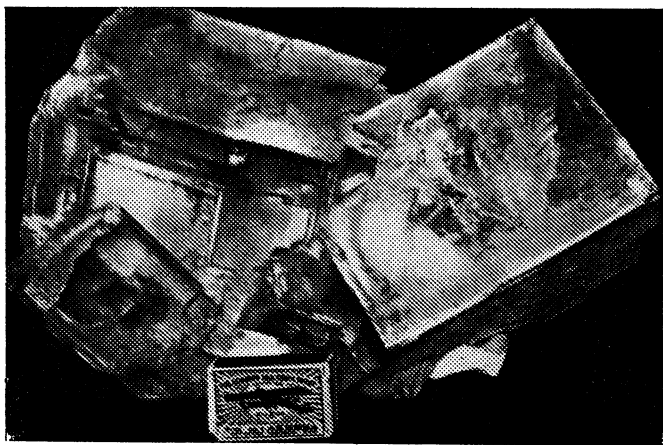


Рис. 39. Кристаллы флюорита. Кули-Колон, Памир.

На рис. 39 показаны изумительные кристаллы голубоватого флюорита из пещеры, найденной на Памире. Вход во флюоритовый грот прячется в отвесной скале над горным озером, и чтобы попасть в него, геологам пришлось висеть на веревках на 200-метровой высоте. Но труд их был вознагражден сказочно прекрасной картиной, открывшейся их глазам. Свод и стены глубокой пещеры были сплошь покрыты огромными кристаллами флюорита поразительной красоты и совершенства. Самой замечательной была друза весом около двухсот килограммов, на которой сидело более ста идеально прозрачных, блестящих, чуть голубоватых кристаллов, каждый в форме куба

с ребром до 10—12 сантиметров. Чтобы спустить ее с величайшей осторожностью с круч горы, потребовался тяжелый двухдневный труд восьми человек и двух лошадей. Теперь эта друза хранится в Минералогическом музее Академии наук в Москве.

Конечно, далеко не всегда жилы и пустоты бывают такими громадными; в мелких жилах вырастают не гиганты, а мелкие кристаллики или кристаллические зерна неправильной формы.

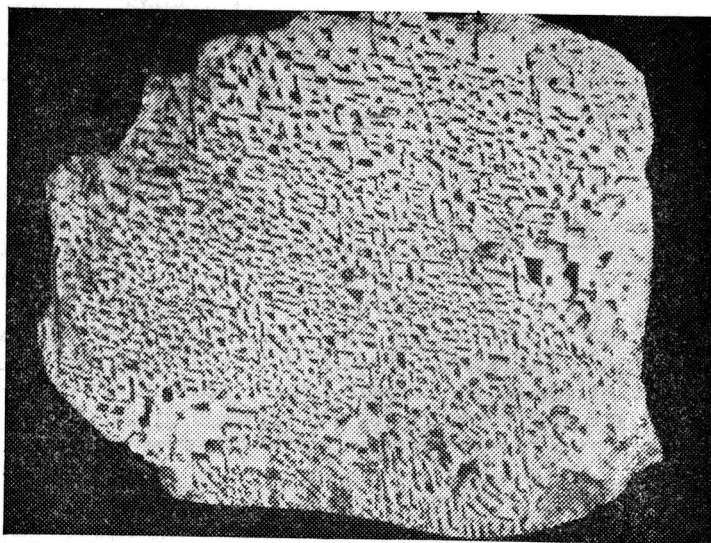


Рис. 40. Темные кристаллы кварца, проросшие сквозь светлый полевой шпат, образуют письменный гранит.

Иногда в жилах возникают горные породы с очень интересным строением: в них зерна одного из минералов как бы прорастают сквозь другой минерал. Например, когда кристаллы кварца прорастают сквозь полевой шпат, кристаллизующийся одновременно с кварцем, образуется горная порода, называемая письменным гранитом (рис. 40). Даже беглый взгляд на излом этого камня сразу объясняет, почему ему дали такое название: неправильно огранные

кристаллы кварца, обычно темного, образуют на светлом фоне полевого шпата странные фигуры, отдаленно напоминающие древние письмена. Сходство это настолько поразительно, что невольно начинаешь отыскивать отдельные буквы на поверхности камня.

Как курьез можно вспомнить, что в начале прошлого века, когда еще не научились читать египетские иероглифы, один немецкий профессор геологии всерьез доказывал, что иероглифические надписи, найденные в археологических раскопках, и узоры письменного гранита — это одно и то же, и что надписи в египетских пирамидах — это отнюдь не следы древних цивилизаций, а своеобразная «игра кристаллических сил».

### **В природных музеях**

«Вы, творцы толстых фолиантов, написанных в кабинете, о происхождении цинковых руд или о свойствах тысячи шлифов змеевика, умеете ли вы так любить и ценить камень? Поняли ли вы, в разговоре с ним наедине, его язык, разгадали ли вы тайны пестрого наряда его кристаллов, таинственные созвучия его красок, блеска, форм?

Нет, если вы не любите камня, если вы не понимаете его там, в самой горе, в забое, в руднике, если не умеете в самой природе читать законы прошлого, которые рождают его будущее, то мертвыми останутся все ваши ученые трактаты, и мертвецами, безоружными, изуродованными, будут лежать бывшие камни в ваших шкафах».

Эти вдохновенные, от глубины сердца идущие слова принадлежат знаменитому советскому минералогу и геохимику академику Александру Евгеньевичу Ферсману (1883—1945).

Нельзя ограничиться изучением камня только в музее или в лаборатории, — это неустанно внушал своим ученикам А. Е. Ферсман. Конечно, надо определить форму кристаллов, с величайшей тщательностью исследовать химический состав минерала, проникнуть в тайны его внутреннего строения, описать его физические и химические свойства. Но это не все. Нужно знать, как, в каких условиях образовался минерал в природе, какие спутники и соседи

были у него, где и как он залегает. В музее этого не узнаешь: ведь там поневоле мы имеем дело с минералом, оторванным от природных условий, изолированным, мертвым.

«Естественную историю нельзя выучить в кабинете из шкафов и ящиков — нужно самому в разных рудниках побывать», — советовал и М. В. Ломоносов.

В Советском Союзе есть район, где природа как будто нарочно, на показ, с необычайной щедростью собрала громадное разнообразие минералов. Здесь создан единственный в мире природный музей камня — Ильменский минералогический заповедник. Он раскинулся на лесистых склонах Ильменского хребта, на Южном Урале, близ ст. Миасс, у синих озер Тургояк, Кисягач и множества других. Нигде в мире нельзя встретить такого неповторимого, изумительно богатого сочетания минералов, как в Ильменских горах. Недаром минералоги называют Ильменский заповедник «Уральской копилкой», «Кладовой Земли», «Минералогическим раем».

В музее Ильменского заповедника висит интересная таблица: она показывает, что из полутора сотен минералов Ильменских гор 30 впервые были найдены именно в Ильменах, 9 минералов нигде, кроме Ильмен, не встречаются на Земле, 5 минералов и две горные породы названы в честь Ильмен и Миасса (ильменит, миасскит, ильменорутит и др.), 50 минералов являются редчайшими.

«Много раз я посещал эти замечательные копи, — пишет А. Е. Ферсман, — я никогда не видел ничего более прекрасного, хотя много месторождений цветных камней приходилось видеть раньше — и на солнечном юге острова Эльба, и в жилах угрюмой Швеции, и на Алтае, — но нигде меня не охватывало такое чувство восхищения перед богатством и красотой природы, как на амазонитовых копях Ильменских гор. Глаз не мог оторваться от голубых отвалов синевато-зеленого амазонского шпата. Все вокруг засыпано остроугольными осколками этого камня, блестит на солнце, отликает мельчайшими пертитовыми вростками\*), резко отличаясь от зеленого тона ливны и

---

\*) Пертиты — сростки калиевого и натриевого полевых шпатов.

травы. Я не мог скрыть своего восторга перед этим богатством и невольно вспоминал немного фантастический рассказ старого минералога о том, что целая каменоломня в Ильменских горах была заложена сплошь в одном кристалле амазонского шпата».

Слава об Ильменских горах разнеслась по всему свету еще в XIX в. Все минералогические музеи мира гордятся образцами ильменских минералов. Поколения минералогов учились на Ильменских копиях. Но тем временем старатели, коллекционеры, горнозаводчики, торговцы камнями расхищали богатства Ильмен.

Академики В. И. Вернадский (1863—1944), А. Е. Ферсман и профессор В. И. Крыжановский (1881—1947), страстный любитель и непревзойденный знаток камня, впоследствии директор Минералогического музея Академии наук СССР, упорно добивались охраны богатств Ильменских гор еще до Великой Октябрьской революции. Но лишь при Советской власти был решен вопрос о создании Ильменского минералогического заповедника. Уральский писатель П. Бажов рассказал в сборнике «Малахитовая шкатулка» народную легенду «Солнечный камень» о ходоках, побывавших с ильменскими камнями у В. И. Ленина в годы гражданской войны.

В тяжелое время гражданской войны, блокады, голода и разрухи, в мае 1920 г., был издан декрет Совета Народных Комиссаров за подписью В. И. Ленина. Ввиду исключительного научного значения Ильменских гор на Южном Урале, у Миасс, и в целях охраны их природных богатств, Совет Народных Комиссаров постановил: объявить отдельные участки Ильменских гор на Южном Урале, у Миасс, государственным минералогическим заповедником, т. е. национальным достоянием, предназначенным исключительно для выполнения научных задач страны.

В 1940 г. Ильменскому минералогическому заповеднику было присвоено имя В. И. Ленина.

В Ильменском минералогическом заповеднике работает научная станция. Экскурсанты приезжают в заповедник, чтобы познакомиться с тем, как образуются минералы, как они залегают, где их находят. На территории заповедника расположено свыше по-



лутораства копей. Копи расчищены и приведены в такой вид, как будто в них ведется разработка и добыча минералов, но на самом деле добычи тут нет, из заповедника нельзя унести ни одного камня. Экскурсанты, спускаясь в копь, видят на ее стенках и на



Рис. 41. Академик Александр Евгеньевич Ферсман (слева) и профессор Владимир Ильич Крыжановский в Минералогическом музее Академии наук СССР

дне различные минералы, минеральные жилы, гнезда кристаллов — видят их не в витринах музея, а в природных лабораториях. Здесь постигаются тайны рождения кристаллов, скрытые обычно под покровом земли или безжалостно нарушаемые лопатой, буром, отбойным молотком при всякой попытке проникнуть в ее недра.

Многие районы Урала могли бы претендовать на то, чтобы стать такими же заповедными, как Ильменские горы. Расскажем еще об одном из них.

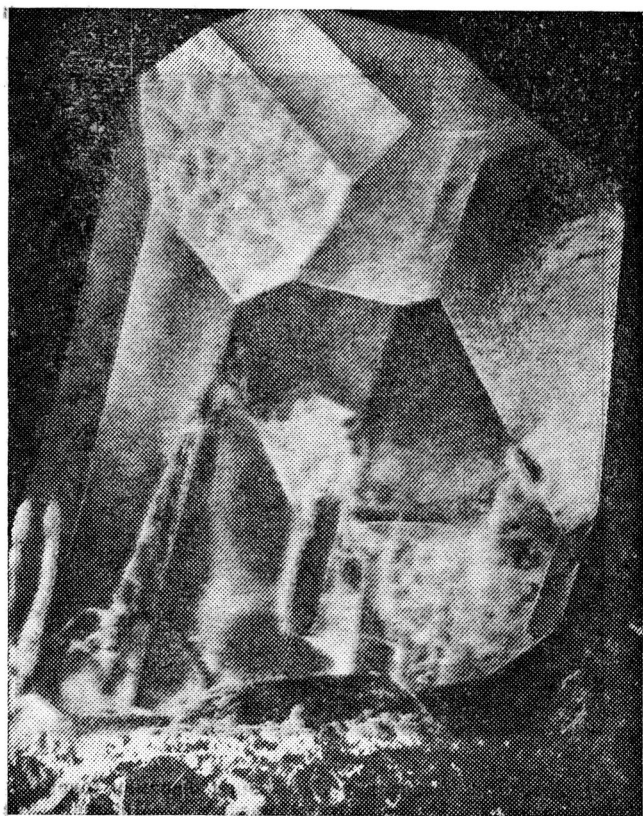


Рис. 42. Кристалл топаза. Уменьшено в 2 раза.

В 1668 г. около Мурзинской слободы на берегу реки Нейвы, к северу от нынешнего Свердловска, крестьянин Михайло Тумашев нашел цветные камни и медную руду. Вскоре там же были найдены прозрачные горные хрустали, аметисты, бериллы, топазы.

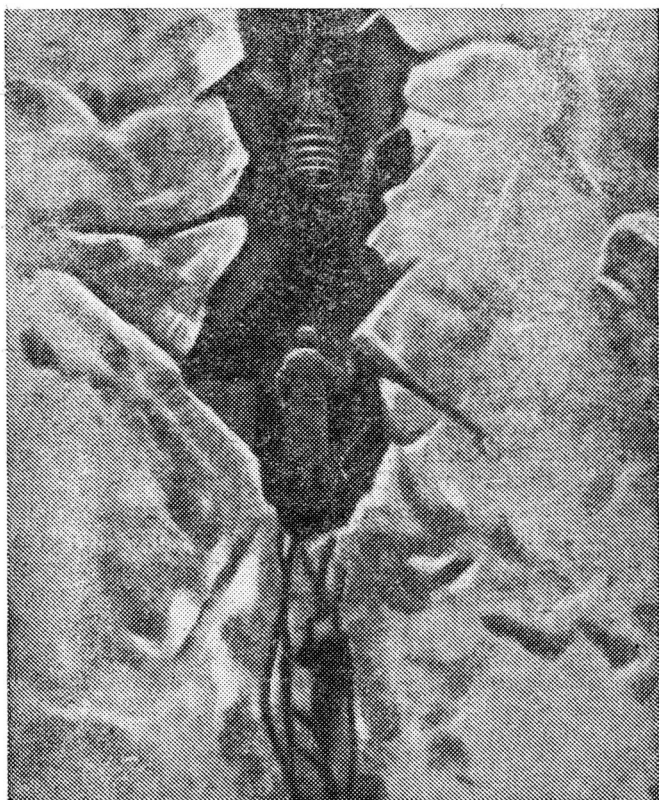
Слава о цветных камнях Мурзинки стала распространяться по всей стране.

«Мурзинка,— писал академик Александр Евгеньевич Ферсман,— это одно из самых замечательных месторождений самоцветов, которые иногда вывозились отсюда целыми возами. Самоцветы Мурзинки — не только гордость и ценность минералогических музеев мира, это начало науки о русских минералах, основа точного изучения природных кристаллов. Но Мурзинка — не только значительный этап в развитии нашей науки, не только наша гордость,— с ней связано начало настоящей культуры камня в России, ее каменной промышленности с многочисленными мастерскими и фабриками и самого оградочного и камнерезного дела в России. Здесь выросли первые специалисты — мастера по камню, знатоки и любители камня, первые минералоги, положившие начало исследованиям богатств Урала...»

На рис. 43 изображена картина «Каменный ров» художника А. К. Денисова-Уральского. Вот как он сам описывал в 1911 г. эту картину: «Каменный ров находится вблизи дер. Сизиковой, Зырянской и Южакowej (Мурзинский район). Месторождение аметистов около названного рва известно было сто лет тому назад. В верхних частях жилы найдены аметисты величиною, как выражаются местные крестьяне, с конское копыто, отчего один из участков работ по этой жиле до сих пор носит название «Конское копыто». Жила идет вертикально в глубь земли. На картине изображена часть выработанной жилы, представляющая в данное время как бы ущелье шириною от полуметра до метра.

Чтобы нагляднее уяснить, как производится добыча самоцветов, на картине (рис. 44) изображена в разрезе одна из шахт глубиной до пятидесяти метров. Щель, в которой производится добыча аметистов, простирается по поверхности земли метров на двести. На дно щели свет проникает весьма слабо, и старателям приходится работать с искусственным освещением, обыкновенно с простой свечой. В подобных выработках рабочие спускаются в шахту в ушах на изношенном канате, грозящем ежеминутно смертью тому, кто ему доверится. Но это не

останавливает смельчаков, жаждущих наживы. Жгучее чувство неизвестности, как азарт, который испытывают игроки или охотник, увидевший своего верного



**Рис. 43.** Каменный ров, добыча аметистов старателями. Картина Денисова-Уральского, 1911 г.

пса, делающего стойку, захватывает старателя, на толкнувшегося на жилу, которая, по его приметам, обещает гнездо аметистов. От волнения захватывает дух. Лихорадочно трясущимися руками откалывает он кусок породы, ожидая каждую минуту увидеть до-

рогой кристалл. Для этого стоит рискнуть. Тут много своеобразной поэзии!».

Это было написано в 1911 г. А вот отрывок из письма студента, побывавшего незадолго до Великой Отечественной войны на знаменитой копи Мокруше в том же Мурзинском районе.

«На Мокрушу мы попали уже к вечеру, когда солнце спускалось и жара спадала. Нас провожал

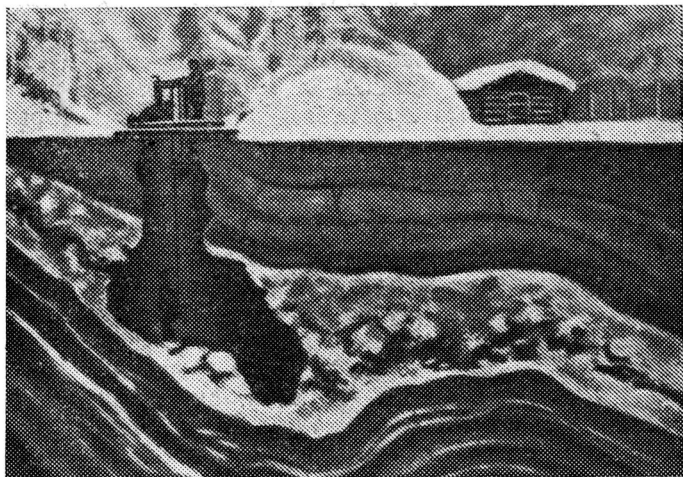


Рис 44. Месторождение топазов. Геологический разрез копи «Мокруша», разработка копи старателями. Картина Денисова-Уральского, 1911 г.

один из лучших знатоков этого района, колхозник Андрей Хрисанфович Южаков. Он из той знаменитой семьи старателей Южаковых, о которых пишут и академик Ферсман и другие минералоги. Отец его, дед, все родные и дети и внуки его — все знатоки и страстные любители камня. Такие семьи здесь встречаются очень часто. Кажется, он всю жизнь копался в любимой Мокруше и не раз сопровождал туда Александра Евгеньевича Ферсмана.

Мы знали, что Мокруша уже заброшена, выработки там прекращены, но все же хотелось посмотреть

на эту знаменитую копь, из которой добыты чудесные образцы кристаллов, украшающие все музеи мира.

Южаков уверенно вел нас по еле заметным тропинкам. По дороге он рассказывал нам, какие замечательные кристаллы (их называют здесь «струганцами» — правда, меткое название? Ведь у них действительно грани как бы «выструганы») находились и находятся в Мурзинском районе.

Он рассказал, что лет двадцать назад был найден «занорыш» такой большой, что в него могла въехать телега. В нем оказались кристаллы «самоцвета» (горного хрусталя) длиной до 75 сантиметров и великолепные голубые кристаллы топазов, из которых самый большой весил около двух пудов. Южаков выругался, когда вспомнил, как неопытные старатели разбили кристалл, чтобы продавать его по кускам.

Он рассказывал нам, как кустарно, хищнически велась добыча камней на Урале до Великой Октябрьской революции. От его рассказов у меня сложилось впечатление, что это было совершенно варварское разграбление — каждый копал, где успевал захватить участок, без всякой системы, выбирали драгоценные кристаллы топазов, турмалинов, бериллов с поверхности и заваливали опять копь, чтобы кто-нибудь другой не воспользовался ею. Тут же, в деревнях, кустари гранили камни и продавали их кулакам-скупщикам, богатевшим на каменном деле.

Лишь после Великой Октябрьской революции разработка Мурзинских, так же как и всех других, копей и добыча драгоценного камня стали государственным делом. Мокруша уже выработана, но государство разрабатывает десятки других копей, добывая горный хрусталь, топазы, изумруды, турмалины и многие другие минералы.

Разговаривая, мы незаметно подошли к Мокруше. Она была заброшена еще в 1916 г.; без Южакова мы бы, пожалуй, не догадались, что тут была копь. Это — полянка в лесу, густо заросшая травой и мелким кустарником.

Южаков показал нам на кучку обломков письменного гранита: «Вот это «отвалы» — то, что отбрасы-

вается при выработках. В копь-то нам уже не попасть, водой залита, а вот в отвалах, может, и найдем что-нибудь». Говоря это, он разбирал камни.

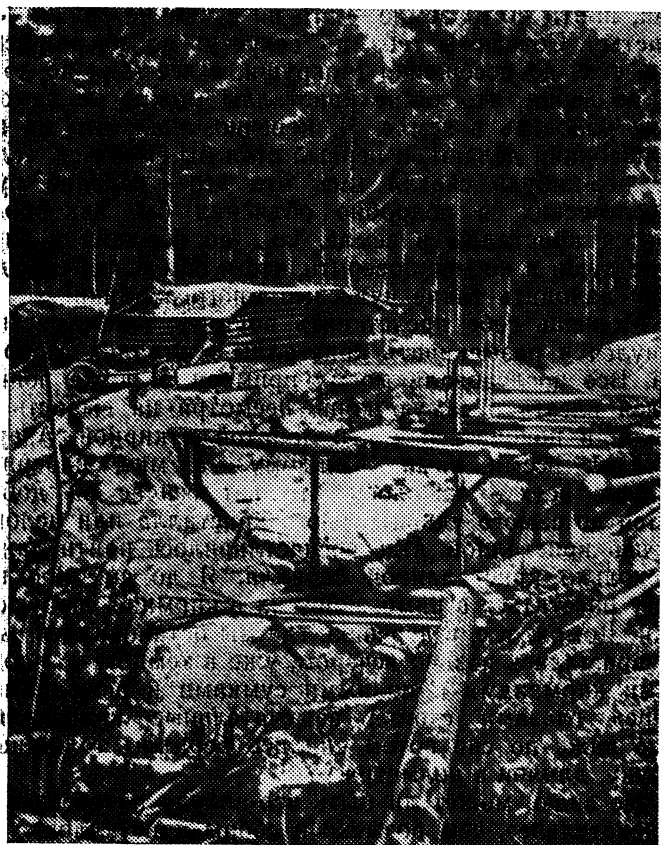


Рис. 45. «Яма» старателя Южакова. Мурзинский район, Урал.  
Фото А. Е. Ферсмана, 1912 г.

«Вот, вот! Смотрите!» Он был возбужден, радостно улыбался. «Вот и струганец». На ладони его действительно лежал очаровательный кристаллик дымчатого горного хрусталя.

Я часто держал в руках кристаллы в нашем минералогическом музее, мы с тобой не раз выращивали кристаллы, но, знаешь, найти самому настоящий кристалл, с блестящими гранями, чистый и прозрачный, найти его в земле — это ни с чем не сравнимое счастье! Сознаюсь тебе по секрету: до вчерашнего дня, т. е. до посещения Мокруши, я все-таки до конца не верил, что такие кристаллы можно на самом деле находить в земле. Я, конечно, знал, что их не волшебники делают, и первый стал бы смеяться, если бы кто-нибудь сказал мне, что это — изделия рук человеческих, я подробно объяснил бы, как образуются кристаллы в земле, но... но все-таки в глубине души я не мог поверить, что я сам когда-нибудь буду находить такие чудесные многогранники!

Можешь себе представить поэтому, как страстно кинулся я разыскивать кристаллы в отвалах Мокруши. Все последовали моему примеру. Я даже попытался влезть в самую копь, несмотря на сырость и завал, и покопаться в ней лопатой и киркой. Азарт овладел всеми нами. Каждому — а мне, наверно, больше всех — казалось, что вот сейчас он доберется до самого удивительного кристалла или целого гнезда кристаллов. Мне посчастливилось найти даже несколько кристалликов берилла. Я до сих пор не могу расстаться с ними, ношу их в кармане, люблюсь ими. Домой, т. е. в деревню, где мы остановились, мы возвращались поздно вечером, уже в темноте, с набитыми карманами и полными сумками и рюкзаками. Перед глазами стояли замечательные кристаллы. Мне даже во сне потом снились бериллы толщиной в руку, длиной в полметра.

Не знаю, может ли быть что-нибудь интереснее и увлекательнее, чем розыски и сборы кристаллов!»

И снова проходят годы. Нет в живых уже ни певца и знатока русского камня академика Ферсмана, ни влюбленного в камень горщика Южакова. Но в конце 60-х годов в маленькой заметке в «Известиях» читаем, что уральские геологи продолжают разведывать «Мокрушу». И снова в ней обнаружены богатые гнезда самоцветов. Только из одного гнезда извлечено 12 больших кристаллов топаза весом от 550 граммов до 3 килограммов и 5 уникальных друз



мориона. Намыто также более 100 килограммов отдельных кристаллов мориона. Эти редкие по красоте и нежности тонов самоцветы могут быть украшением

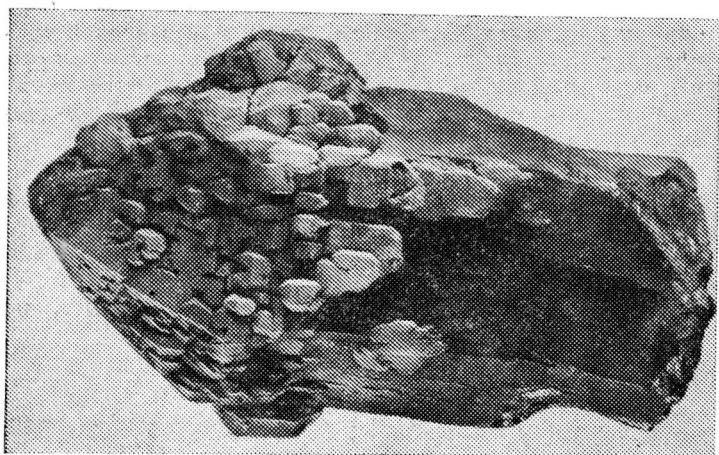


Рис. 46. Аметист с паросшими на него мелкими кристаллыками. Мурзинка, Урал  $\frac{1}{4}$  натуральной величины.

любого музея мира. Геологи заявляют, что главные находки впереди. В селе Мурзинка создан ныне музей самоцветов.

### **О соли, соляных озерах и свойствах растворов**

Свыше пятисот лет назад древнерусские солевары научились извлекать соль из соляных источников. Иначе говоря, они научились растить кристаллы соли. Советский Союз необычайно богат месторождениями ископаемой каменной соли, соляными озерами и источниками. Одно лишь озеро Баскунчак в Астраханской степи могло бы обеспечить солью весь Советский Союз на четыреста лет. В озере, кажется, больше соли, чем воды.

Вода в соляных озерах горько-соленая, в ней растворено много различных солей. Летом, когда под

лучами палящего солнца вода озер быстро испаряется, из нее начинают выпадать кристаллы солей. Эти кристаллы плавают на поверхности озера и оседают на дне, на прибрежных камнях, на досках, на любом твердом предмете, попавшем в озеро. Даже рука, опущенная на несколько минут в озеро, покрывается тонким слоем соли.

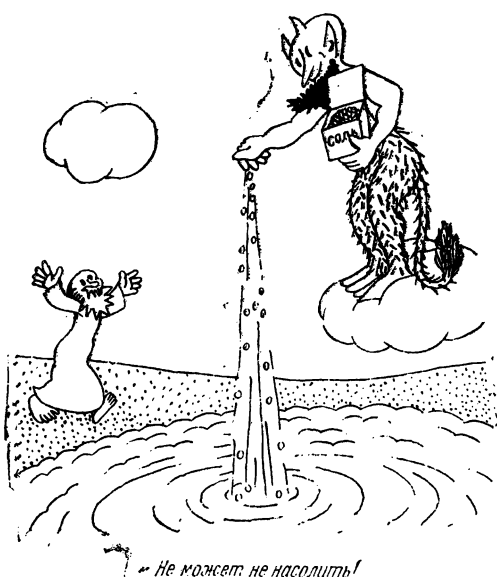


Рис. 47. По мнению художника Жана Эффеля, так образовались соляные озера. Из книги «Сотворение мира и человека».

В Ташкентском минералогическом музее одно время экспонировалась модель мавзолея В. И. Ленина из снежно-белых кристаллов соли. Летом на практике студенты-геологи сделали из фанеры остов модели мавзолея и опустили его в воды соляного озера. Через несколько дней вся фанера покрылась слоем осевших на ней соляных кристаллов.

Подпочвенные воды, насыщенные солями, испаряются под жаркими лучами солнца, и поверхность земли покрывается солевой коркой. Так образуются солончаки, превращая плодородные земли в пусты-

ни. На рис. 48 видна поверхность давно высохших Сарыкамышских озер. Снежно-белая гладь солончака вся растрескалась, разделившись на глыбы поперечником от 100 до 200 метров. Границами между этими глыбами служат пласты поваренной соли в смеси с черным илом, резко выступающие над зеркальной поверхностью. Сила кристаллизации соляных пластов столь велика, что, расширяясь, они выдавливаются из земли, становясь на ребро.

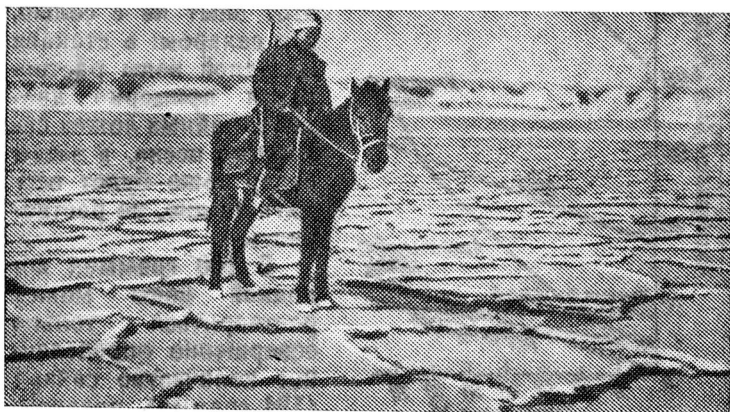


Рис. 48. Солончак Кара-Шор в Западной Туркмении. Глыбы песчаника разгорожены пластами каменной соли, выдавленными при кристаллизации.

Явление кристаллизации солей нетрудно воспроизвести на опыте. Растворите в воде щепотку простой поваренной соли и налейте соленую воду на блюдо. Когда вода испарится (чтобы это было скорее, можно нагреть раствор), посмотрите в лупу, и вы увидите, что на блюде остались правильные белые с плоскими гранями кубики кристаллов. Кристаллы каменной (поваренной) соли образовались из раствора на ваших глазах. Так в миниатюре, на блюде, можно наблюдать явление кристаллизации раствора, которое в природе, в соляных озерах и в подпочвенных водах, происходит в гигантских масштабах.

Почему же кристаллы выделяются из раствора? Чтобы понять это, следует познакомиться с некоторыми свойствами растворов.

Попробуйте растворять в воде столовую соль: в граненом стакане воды растворится 70 граммов (около семи чайных ложек) соли, а если вы будете сыпать

соль дальше, она перестанет растворяться и будет просто оседать на дно. То же самое вы увидите, повторив этот опыт не с солью, а с сахаром: в стакане холодной воды растворится примерно двадцать чайных ложек сахарного песка, а затем сахар тоже будет оседать на дно, не растворяясь.

В 100 граммах холодной воды может раствориться только совершенно определенное количество сахара (194 грамма), поваренной соли (35 граммов) или любого другого вещества. Количество вещества, которое может раствориться в 100

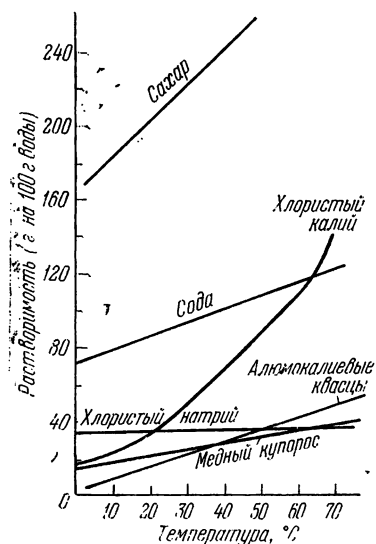


Рис. 49. Зависимость растворимости некоторых веществ от температуры.

граммах воды, называется *растворимостью* этого вещества в воде; например, растворимость поваренной соли в воде при комнатной температуре равна 35 граммам.

Растворимость зависит от температуры. Попробуйте растворить сахар не в холодной воде, а в горячей, и вы убедитесь, что сахар будет растворяться уже в гораздо большем количестве, в зависимости от того, на сколько вы нагреете воду; следовательно, при повышении температуры растворимость сахара увеличивается. У разных веществ растворимость по-разному зависит от температуры (рис. 49).

Итак, при каждой данной температуре в воде может раствориться лишь строго ограниченное количество вещества, определяемое его растворимостью. Теперь мы подошли к вопросу о том, почему же из растворов вырастают кристаллы.

### Как кристаллы растут из растворов

Возьмите стакан горячей воды и всыпьте в него синий порошок медного купороса. Этот опыт можно проделать со всяким другим кристаллическим веществом, растворимым в воде: гипосульфитом, содой, борной кислотой, квасцами, английской солью, поваренной солью. Если вы достанете не порошок, а крупные кристаллы, то сначала растолките их в порошок. В стакан горячей воды всыпьте столько порошка, сколько сможет раствориться; помешивайте воду, тогда порошок будет растворяться быстрее. Когда порошок совсем перестанет растворяться и начнет оседать на дно, слейте образовавшийся раствор в другой стакан так, чтобы на дно стакана с раствором не попало ни одной крупинки порошка. Для этого профильтруйте раствор через фильтровальную бумагу или через чистую тряпочку. В получившемся растворе количество вещества как раз соответствует его растворимости при данной температуре; раствор «насытился», и больше он не может поглотить ни крупинки вещества. Такой раствор называется *насыщенным*.

Теперь оставьте стакан с раствором и дайте ему остыть. При остывании растворимость почти всех веществ уменьшается; пока наш раствор был горячим, в стакане воды было растворено, скажем, 12 ложек вещества, тогда как при комнатной температуре в нем могло бы раствориться лишь 10 ложек этого вещества. Таким образом, теперь в растворе окажется лишнее вещество. Иначе говоря, при высокой температуре раствор был насыщенным, а остыв, он стал *пересыщенным*. Такой пересыщенный раствор не может долго существовать, поэтому лишнее вещество выделяется из раствора и оседает на дно стакана. Рассмотрите в лупу, и вы увидите, что этот осадок состоит из кристаллов.

Растворенное вещество кристаллизуется из пересыщенных растворов потому, что его оказывается в растворе слишком много — больше, чем раствор может удержать в себе.

Пересыщенные растворы могут образовываться и иначе. Оставьте насыщенный раствор в открытом сосуде: он будет испаряться, но ведь испаряется из него только вода, а растворенные вещества остаются. Что же при этом получается? Мы растворяли вещество, например, в 100 граммах воды, и тогда раствор был насыщенным. А через несколько часов испарения останется уже не 100 граммов воды, а, скажем, 98 граммов; опять в растворе оказывается лишнее вещество — раствор снова пересыщен, и из него будут выделяться кристаллы.

Если у вас дома есть только крупная соль, вы можете перекристаллизовать ее в мелкую столовую соль. Это очень легко сделать. Растворите соль в воде, профильтруйте раствор через фильтровальную бумагу или чистую тряпочку и выпарьте этот раствор на медленном огне. Из раствора осядут очень мелкие кристаллики.

Явление пересыщения растворов открыл в 1803 г. член Российской Академии наук Товий Егорович Ловиц (1757—1804). Для него «самым приятнейшим упражнением было делать наблюдения над кристаллообразованием солей». «Образование кристаллов, — писал Ловиц, — есть неоспоримо самое привлекательное и удивительное, но притом доселе еще неизъяснимое действие природы».

Ловиц указал, что если раствор остывает в чистом закрытом сосуде и если при этом нет тряски, толчков, то раствор может некоторое время, иной раз и долго, оставаться пересыщенным, не кристаллизуясь. Но лишь только в жидкости возникает хотя бы микроскопически маленький кристаллик, раствор уже не может сохраняться пересыщенным. Начнется рост кристаллов, который будет идти до тех пор, пока все лишнее вещество не выпадет в виде кристаллов и раствор снова не станет насыщенным. Ловиц так описывал кристаллизацию растворов: «Мне представилось, будто находящиеся в растворе соляные

частицы борются за преимущество первой выделиться из воды, и что та частица, которой это удалось, подобно полководцу, подает сигнал другим следовать за собой».

В природных условиях, в открытых водоемах, пересыщенный раствор не может сохраняться без кристаллизации. Из пересыщенных растворов растут

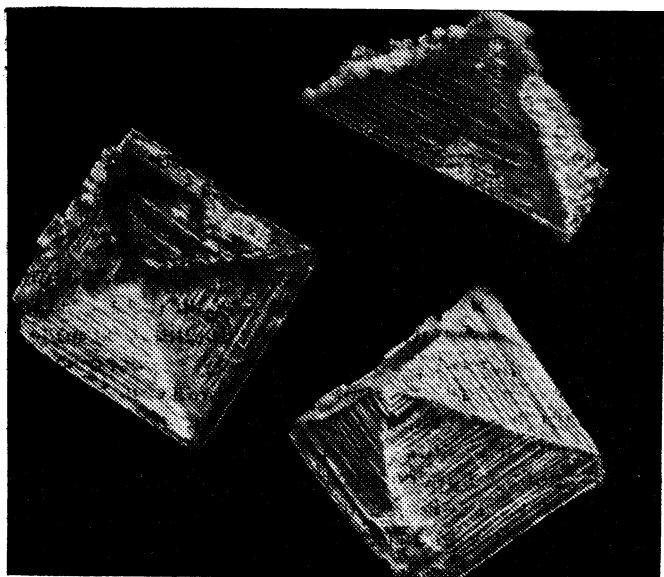


Рис. 50. Воронки самосадочной соли, плавающие на поверхности соляного озера.

кристаллы. Это явление и наблюдается в громадных масштабах в соляных озерах, где вода испаряется под лучами солнца.

На рис. 50 приведена фотография забавных полых пирамидок в виде воронок, состоящих из сросшихся друг с другом кубиков каменной соли. Такие воронки, плавающие, как лодочки, на поверхности соляного озера, наблюдаются только у каменной соли, потому что ее растворимость очень слабо зависит от темпе-

ратуры (см. рис. 49). У большинства веществ с повышением температуры растворимость сильно растет, поэтому и плотность насыщенного раствора повышается. Когда солнце нагревает водоем, где растворены такие соли, вода сверху испаряется, а верхние слои, насыщаясь и тем самым становясь более плотными, опускаются на дно, где и происходит кристаллизация.

Иначе обстоит дело с растворами каменной соли. Хотя солнце греет сверху и вода испаряется, но теплые насыщенные слои остаются на поверхности озера. Здесь же, в верхнем насыщенном слое, начинается кристаллизация. Маленький кристаллик плавает на поверхности озера. Вырастая, кристаллик постепенно опускается, а над ним нарастает маленькая воронка с насыщенным раствором.

Жителям прибрежных полос около морей и соляных озер приходится иметь дело с кристаллизацией совсем не потому, что им нужны кристаллы. Наоборот, им надо избавиться от растворенных в воде солей, чтобы превратить соленую воду в пресную, пригодную для питья. В громадных чанах и цистернах выпаривается морская вода, кристаллы солей оседают на дне и стенках, а пресную воду собирают при помощи особых приспособлений.

Замечали ли вы, что на стенках чайников и кастрюль, в которых кипятят воду, осаждается так называемая накипь? Соскоблите накипь и рассмотрите ее под микроскопом: вы увидите, что она представляет собой скопление очень мелких кристалликов. Они сидят на дне и стенках чайника так же, как кристаллы солей, осадившихся из вод озера, или как кристаллы минералов на стенках «хрустальных погребов».

Как же образуются кристаллы накипи?

В природной воде почти всегда растворены какие-нибудь минеральные вещества; когда вода кипит и испаряется, они выделяются в виде кристаллов и оседают на стенках сосуда, образуя слой накипи. Чем больше посторонних веществ растворено в воде, тем толще слой накипи и тем быстрее он отлагается. Например, в Ленинграде накипь на стенках посуды почти незаметна, потому что в воде реки Невы почти



нет минеральных солей; в московской же воде растворено очень много известковых солей, поэтому в Москве накипь на посуде образуется очень быстро.

Накипь — явление вредное, а иногда и опасное. Всем известно, что чайник с толстым слоем накипи греется медленнее, чем новый чайник. Слой кристаллов на стенках парового котла мешает его работе. Накипь утолщает стенки, уменьшает полезный объем котла, повышает расход топлива.

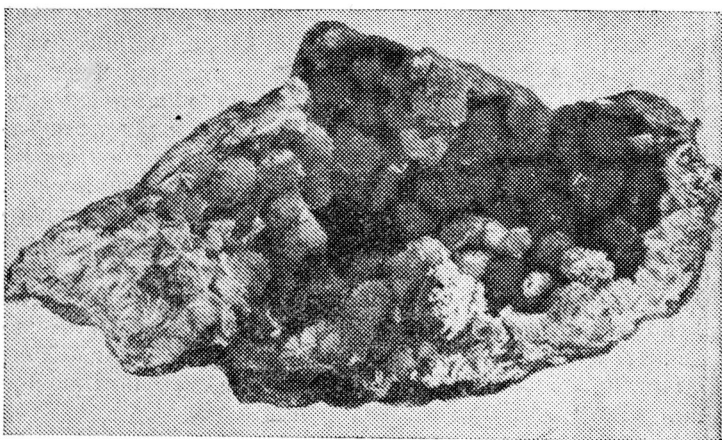


Рис. 51. Жеода с кристаллами гидробората из отложений Индерского озера, Казахстан.  $\frac{1}{8}$  натуральной величины.

Теперь разработаны методы борьбы с накипью с помощью так называемых антинакипинов, т. е. органических веществ (таннина, дубильных экстрактов), которые в ничтожном количестве прибавляются к воде в котле. Характерным свойством антинакипинов является их способность обволакивать тончайшей пленкой мелкие кристаллические пылинки. Как ни тонка эта пленка, а расти кристаллику дальше она не дает. Вместо плотного слоя, покрывающего всю внутреннюю поверхность котла, на его дно оседает рыхлый осадок, удалить который уже не представляет труда.

## Кара-Богаз-Гол

Тигантской природной лабораторией, в которой происходит кристаллизация раствора, является Кара-Богаз-Гол, залив Каспийского моря, отделенный от моря узкой косой, прорезанной лишь в одном месте совсем небольшим проливом.

Константин Паустовский в повести «Кара-Бугаз» приводит письмо-доклад лейтенанта Жеребцова, первого исследователя, посетившего этот залив в 1847 г.: «Все берега пустынные и не имеют пресной воды. Мною не было обнаружено ни единого ручья, каковой выпадал бы в это поистине мертвое море. Вода в заливе имеет чрезвычайную соленость и плотность. Токмо соль, пески и все убивающая жара властвуют над сими негостеприимными берегами. При подходе к заливу оный рисуется в виде купола из красноватой мглы, пугающей с давних времен мореплавателей. Полагаю, что явление это объясняется сильным испарением воды Кара-Богаза. Надлежит помнить, что залив окружен раскаленной пустыней и является, если будет уместно сие сравнение, большим котлом, где выкипает каспийская вода. Грунт залива весьма замечателен: соль, а под ней известковая глина. Соль, полагаю, особенная, не того состава, что обыкновенная, употребляемая в пищу и для засола».

Кара-Богаз мелководен, воды его сильно испаряются под лучами солнца. Поэтому содержание солей здесь в 15—20 раз больше, чем в самом Каспийском море. В каждом литре воды залива растворено около 200 граммов солей, содержащих бром, калий, натрий и магний. Главной из них является мирабилит, или глауберова соль. «Изумительная соль Глаубера» \*) — так называли ее в старину. Мирабилит (сернокислый натр) — ценнейшее сырье для стекольного производства, для получения каустической соды, сернистого натра, серной кислоты и многих других веществ, необходимых в промышленности.

Зимой, когда температура падает, растворимость мирабилита понижается. Если раньше раствор был

---

\*) Глаубер — немецкий химик, живший в XVII в.; «мирабилит» по-латыни — «изумительный».

насыщенным, то теперь он становится пересыщенным, и в нем начинают образовываться кристаллы, которые плавают на поверхности воды, растут, оседают на дно и на берега залива. При температуре рассола в  $+5,5^{\circ}\text{C}$  выпадает твердый, кристаллический осадок чистого мирабилита, между тем как все остальные соли по-прежнему остаются в растворенном состоянии, потому что у них иная растворимость. Зимой, с ноября по март, вода Кара-Богаза становится

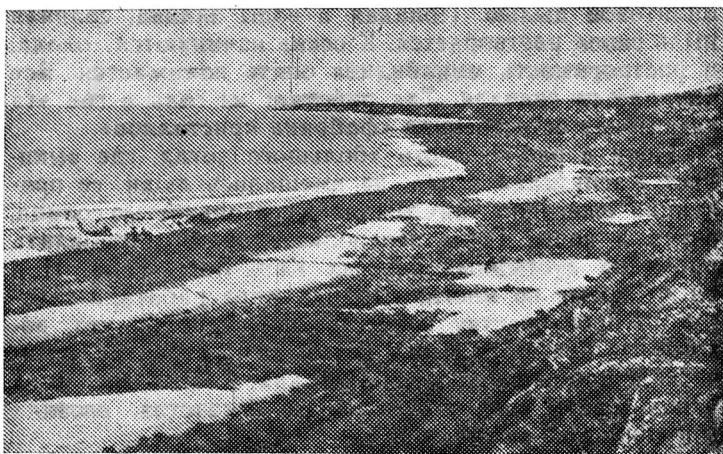


Рис. 52. Отложения кристаллической глауберовой соли на берегу Кара-Богаз-Гола.

насыщенной по отношению к мирабилиту, оставаясь в то же время ненасыщенной по отношению к другим солям. За зиму из вод Кара-Богаз-Гола выделяется грандиозное количество (до 6 миллионов тонн) кристаллов чистого мирабилита.

В те же зимние месяцы в Кара-Богазском заливе господствуют сильнейшие штормы. Они выбрасывают выкристаллизовавшийся мирабилит на берег (рис. 52). Вокруг залива вырастают белые холмы кристаллов мирабилита. Ценнейшее химическое сырье миллионами тонн можно собирать прямо с земли.

Но вот наступает весна, кончаются зимние морозы, снова становится теплее. Повышается температура, а вместе с ней растет растворимость мирабилита. Теперь уже раствор становится недосыщенным, и выросшие зимой кристаллы за лето опять растворяются.

Что происходит с теми горами кристаллов, которые выброшены на берег? Жаркое солнце пустыни сушит их, ветер развевает в порошок. Весь воздух вблизи Кара-Богаз-Гола насыщен мельчайшей мирабилитовой пылью. Попадая в воды залива, соляная пыль снова растворяется. К осени начинаются холода, и растворимость мирабилита опять понижается. Все начинается сначала. Так работает из года в год эта гигантская естественная «фабрика кристаллов».

Пока в работу этого «большого котла, где выкипает Каспийская вода», не вмешались люди, ее продукция ежегодно уничтожалась деятельностью солнца, ветра и воды. Горы неиспользованного мирабилита росли на пустынных берегах Кара-Богаз-Гола. И в то же время во многих странах мира работали заводы по производству искусственного мирабилита, потому что без этого сырья невозможно развитие химической промышленности. Царская Россия, не умея использовать свои колоссальные богатства, ввозила мирабилит из-за границы.

Уже в 1920 г., в тяжелое время гражданской войны, Владимир Ильич Ленин в знаменитой работе «Очередные задачи Советской власти» писал, что соляные богатства Кара-Богаз-Гола необходимо использовать для развития химической промышленности, что разработка этих богатств возможна приемами новейшей техники и что она даст основу невиданного прогресса производительных сил. Владимир Ильич настоял на отправке исследовательской экспедиции к Кара-Богаз-Голу. Эта и следующие экспедиции выяснили, что кроме ценных солей, растворенных в водах Кара-Богаз-Гола, вблизи его берегов находятся залежи каменного угля, нефти, барита, серы, известняка, фосфорита.

На берегу залива ныне выстроен комбинат «Кара-богазсульфат». Конечно, он не удовлетворяется теми кристаллами, которые шторм выбрасывает на

берег. Мирабилит добывают теперь прямо со дна залива машинами — солесосами и экскаваторами. Кроме того, воду Кара-Богаз-Гола перекачивают в специально вырытые на берегу бассейны: там она испаряется, выделяя кристаллы чистого мирабилита. Эти кристаллы собирают и уже не дают им растворяться в водах залива или смешиваться с песком на его берегах.

Кара-Богаз-Гол практически неисчерпаем. В этой величайшей в мире природной «фабрике кристаллов» находятся запасы в несколько десятков миллиардов тонн мирабилита и других солей. Воды Каспийского моря приносят в Кара-Богаз-Гол все новые и новые запасы солей. Перспективы использования богатств Кара-Богаз-Гола грандиозны. Кара-Богаз — ныне мощная база большой химии.

### **Кристаллы солей под землей**

Облик Земли непрерывно меняется: горы разрушаются в одних местах и возникают в других, моря то разливаются шире, то отступают от берегов. Там, где сейчас стоит Москва, около тридцати миллионов лет назад бушевало море. Его давно уже нет, и лишь по горным породам и окаменелостям можно установить, что оно было.

Высыхают и соляные озера. Отложившаяся на их дне соль оказывается погребенной под другими породами. Так образуются залежи «ископаемых» солей.

Обыкновенная столовая (поваренная) соль, хлористый натрий, без которого человек не может обойтись, представляет собой очень мелкие кристаллики (размолотая соль), в земле же соль встречается иногда в виде очень больших кристаллов — так называемой каменной соли (рис. 53). Ломоносов в книге «О слоях земных» определяет: «Каменная соль есть чистая горная соль, хрусталу подобная».

В песчаных пустынях встречаются горные хребты, представляющие собой гигантские залежи кристаллической каменной соли. Причудливы и удивительны формы соляных скал; это — как бы фантастические постройки из необычного белого материала, отсвечивающего холодным блеском. Ни одного кустика,

ни одной травинки нет на склонах соляных гор. Лишь иногда по соляному руслу между соляных берегов журчит соленый ручеек.

Несколько десятков лет назад в африканской пустыне Сахаре нашли развалины древнего города, построенного из необычного материала: дома и городские стены в нем были сделаны из больших глыб

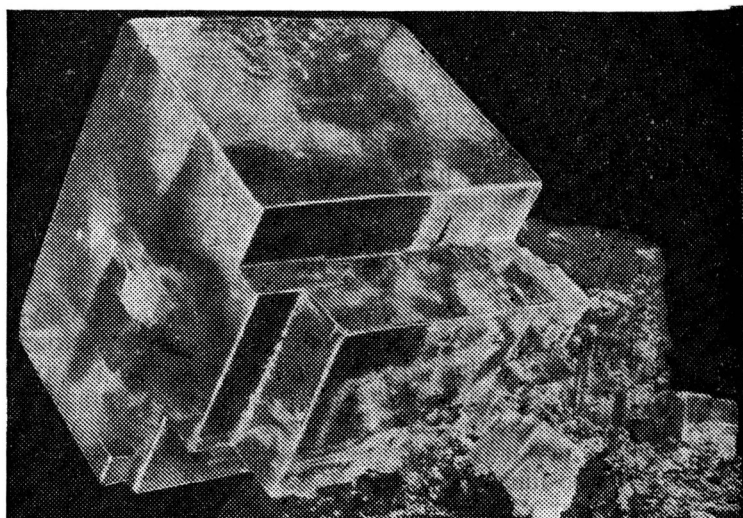


Рис. 53. Кристаллы каменной соли.

каменной соли. В этой местности ничего не было, кроме песка и соли; а из песка дом никак не построишь, вот и пришлось строить из кристаллической соли. Дождей в Сахаре почти не бывает, и остатки соляного города простояли там сотни лет.

В других областях Африки, наоборот, каменной соли так мало, что, например, в некоторых местностях Эфиопии кристаллические брусочки каменной соли вплоть до наших дней употреблялись вместо денег. Об этом можно прочесть у Ломоносова в той же книге «О слоях земных»: «Об абиссинской горной соли уномянем, которая там вместо денег употребляется

так что за три или за пять брусков, сделанных наподобие кирпича, холопа купить можно».

В нашей стране есть много крупных месторождений ископаемой каменной соли: Солотвино в Закарпатье, Соль-Илецк близ Оренбурга и другие. Пласты соли здесь простираются в глубь на километры. Подземные разработки соли ведутся несколькими этажами. Соляной рудник — это подземный соляной город с улицами, площадями, огромными залами, которые по размеру сравнимы с высотными домами. Стены и своды этих грандиозных подземных чертогов вырублены в толще соляного пласта из каменной соли, настолько твердой и плотной, что они не нуждаются в каких-либо крепях.

Соль мерцает кристаллами льда.  
Сквозь пласты мы вступаем в былое.  
Это — тысячелетье труда!  
Двадцать пять этажей под землю! \*)

Громадные залежи каменной соли расположены также вблизи города Артемовска в Донбассе. Город Бахмут — ныне Артемовск — уже более ста лет назад был крупным центром соляной промышленности. Даже на старинной марке земской почты Бахмутского уезда (рис. 54) нарисован знак соли, как ее условно изображали алхимики средневековья: на двуцветном щите кольцо, разделенное на две части. Наверное, это единственный случай в истории филателии, когда на марке отражена промышленность, основу которой составила кристаллизация солей!

Крупнейшее в мире месторождение ископаемых калийных солей разрабатывается под Соликамском. Калийные соли применяются для повышения плодородия почвы и в различных химических производствах — мыловаренном, стекольном, красильном. Недаром сильвин — хлористый калий — называют «каменем плодородия».

Еще в начале XV в. новгородские промышленники разведали за Камой соляные месторождения, и вся местность на многие километры получила название Соли Камские. Немного позже на речке Усолке

---

\*) Л. Хаустов, «Лирический горизонт», М., 1972, стр. 60.

возник посад Соли Камские, выросший со временем в город Соликамск. До Великой Октябрьской революции на Соликамских землях имелись лишь кустарные промыслы поваренной соли, а калийные соли ввозились в Россию из-за границы. В 1916 и 1917 гг. выдающийся русский химик академик Н. С. Курнаков

исследовал буровые скважины Соликамска и на основании созданной им теории физико-химических свойств растворов предсказал, что количество калия в рассолах должно расти с увеличением глубины. Предсказания оправдались: запасы калийных солей в Соликамске оказались грандиозными.

Для разработки соляных пластов иногда пользуются интересным способом: соль из-под земли не выкапывают, а вымывают мощной струей воды. Вода растворяет соль; вынесенный на поверхность земли рассол выпари-

вают и получают кристаллическую соль. Иначе говоря, под землей кристаллы соли растворяют, а на земле их снова кристаллизуют.

### Кристаллы в пещерах

Все природные воды — в океанах, морях, озерах, ручьях и подземных источниках — являются естественными растворами, все они растворяют встречающиеся им породы, и во всех этих растворах происходят сложные явления кристаллизации.

Особенно интересна кристаллизация подземных вод в пещерах. Капля за каплей просачиваются воды



Рис. 54. Знак каменной соли на марке земской почты города Бахмута (ныне Артемовск), центра соляных промыслов XIX в.



и падают со сводов пещеры вниз. Каждая капелька при этом частично испаряется и оставляет на потолке пещеры вещество, которое было в ней растворено. Так постепенно образуется на потолке пещеры маленький бугорок, вырастающий затем в сосульку. Эти сосульки сложены из кристалликов. Одна за другой капли мерно падают день за днем, год за годом, века за веками. Звук их падения глухо раздается под сводами. Сосульки все вытягиваются и вытягиваются, а навстречу им начинают расти вверх такие же длинные столбы сосуллек со дна пещеры. Иногда сосульки,

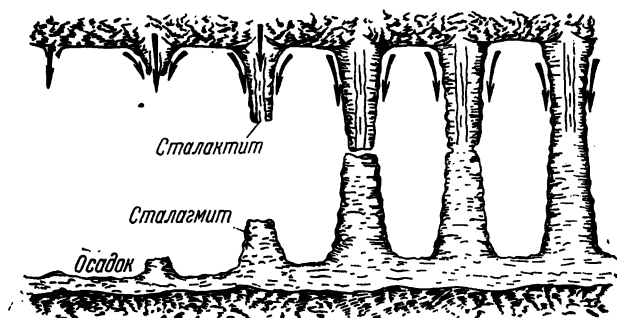


Рис. 55. Образование сталактитов и сталагмитов по А. Е. Ферсману.

растущие сверху (сталактиты) и снизу (сталагмиты), встречаются, срастаются вместе и образуют колонны (рис. 55). Так возникают в подземных пещерах узорчатые, витые гирлянды, причудливые колоннады. Сказочно, необыкновенно красивы подземные чертоги, украшенные фантастическими нагромождениями сталактитов и сталагмитов, разделенные на арки решетками из сталактитов (рис. 56, 57).

Одна из интереснейших и величайших пещер мира находится близ города Кунгур Пермской области. Ее гроты, коридоры и туннели протянулись под землей на много километров, образуя местами три и даже четыре яруса. В старинной уральской песне поется о том, как в «каменных хоромах» Кунгурской пещеры зимовал атаман Ермак Тимофеевич, а с ним и «дружина его, ни много ни мало двести человек».

Стены и своды Кунгурской пещеры покрыты тонкими, прозрачными пластинками крупных кристаллов льда. Ледяные цветы, иголки, пластинки, ледяные

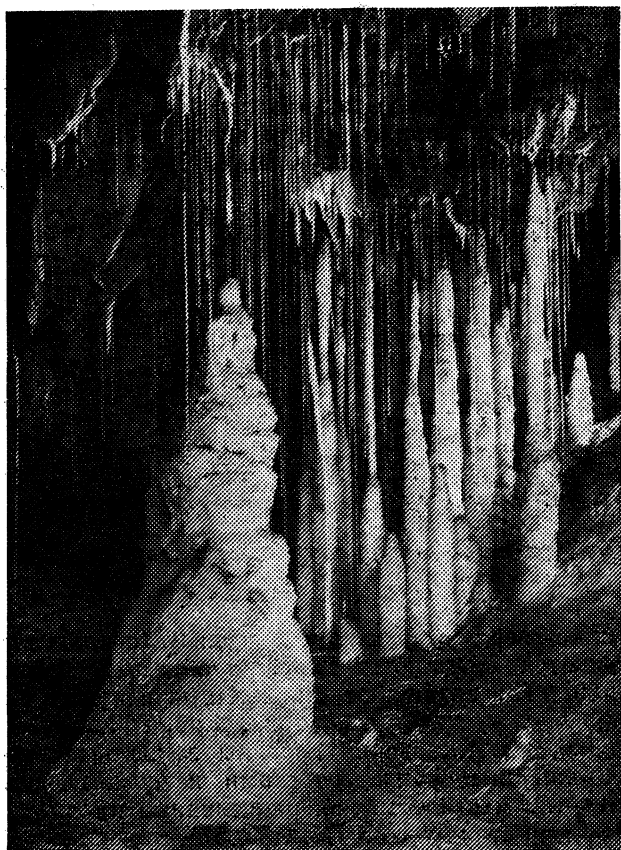


Рис. 56. Сталактиты и сталагмиты в пещере Пунква, Моравия

гирлянды блестят и переливаются при свете факелов, как драгоценные камни. Со сводов свисают ледяные сталактиты, навстречу им поднимаются ледяные сталагмиты. Камни обросли толстой коркой льда.

Огромный «Бриллиантовый» грот представляет собой незабываемое зрелище: своды и стены его украшены белыми пушистыми хлопьями, состоящими

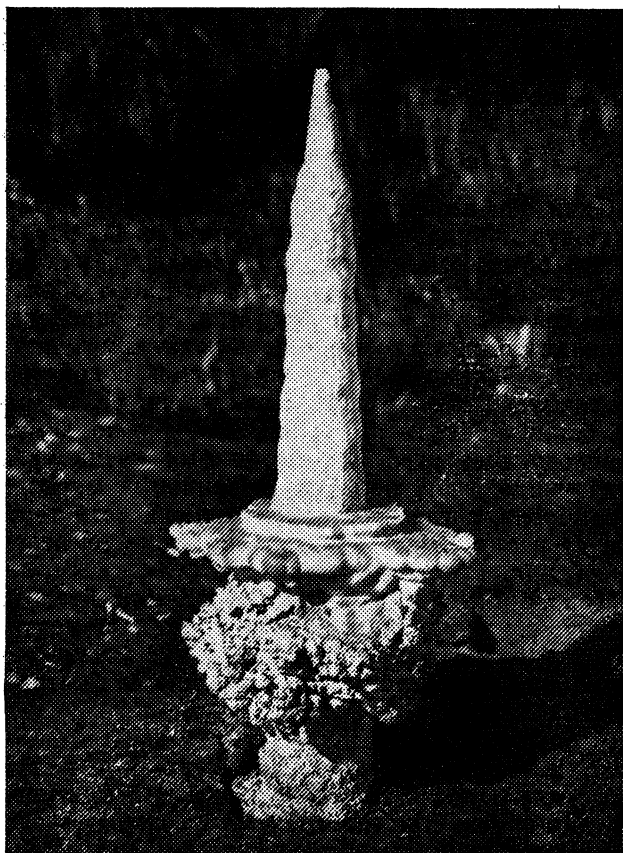


Рис. 57. Сталагмит «Подсвечник» в Слоупской пещере, Моравия.

из множества спаянных между собой крупных кристаллов льда, а ледяные сталактиты и сталагмиты стоят величественной колоннадой. В гроте «Полярном» оригинальные ледяные натеки похожи на скованный льдом водопад. Веера ледяных кристаллов

напоминают своим расположением северное сияние. «Грот дружбы народов» — это грандиозный и величественный зал с ледяными арками, столбами и ледяными гирляндами на глыбах белого камня.

Поразительная красота сталактитовых пещер неизменно привлекает туристов и экскурсантов, которые не только любуются красотой кристаллов, но и — увы! — нередко разоряют и ломают их.

### Переохлажденные жидкости

Один из изобретателей термометра, данцигский стеклодув Фаренгейт, производя в 1724 г. различные опыты, между прочим наблюдал, как происходит замерзание воды. Он знал, что вода обязательно замерзает, т. е. кристаллизуется, при определенной температуре, которую мы теперь называем нулем градусов \*). Однажды, наполнив чистой водой чистую стеклянную банку и плотно закупорив ее, он выставил банку на ночь на мороз, чтобы вода замерзла. На следующее утро Фаренгейт был очень удивлен, когда увидел, что, несмотря на сильный мороз, вода не замерзла, а так и осталась жидкой, хотя температура ее и опустилась значительно ниже температуры замерзания.

Каково же было изумление Фаренгейта, когда, стоило ему открыть свою банку, как моментально вода начала замерзать; в ней возникло множество ледяных игл, пролизывающих жидкость и быстро растущих.

С большим рвением принялся Фаренгейт за изучение нового любопытного явления. Он охлаждал воду в открытых и закрытых сосудах и смотрел, как она замерзает. Оказалось, что в закрытом сосуде вода может охладиться до нескольких градусов ниже нуля и все же не замерзнуть. Но стоит потом открыть сосуд с водой или даже, не открывая, сильно

---

\*) Температуру, которая в современной стоградусной шкале термометра принята за 0°, Фаренгейт определял как 32°; за 0° он принимал температуру смеси снега и нашатыря, а за 100° — нормальную температуру человеческого тела. Температурная шкала Фаренгейта применяется теперь лишь в немногих странах.

встряхнуть его, как почти мгновенно воду пронизывают ледяные иголочки и вся вода сразу начинает замерзать.

В дальнейшем (уже не только Фаренгейтом) были исследованы законы замерзания и воды, и различных растворов и расплавов. Оказалось, что остывший расплав может и не закристаллизоваться, если он стоит в спокойном месте в закрытом сосуде. Это явление называли *переохлаждением* расплава. Расплав должен начать кристаллизоваться при определенной температуре кристаллизации, но он охлаждается ниже этой температуры и все же не закристаллизовывается, остается жидким.

Известны случаи, когда переохлажденные расплавы сохранялись, не кристаллизуясь, по несколько месяцев и даже лет! У одного английского кристаллографа сильно переохлажденный жидкий салол в запаянном сосуде не кристаллизовался восемнадцать лет. Профессор не раз показывал этот расплав на лекциях, демонстрируя своим слушателям возможность длительного существования переохлажденных расплавов. А на девятнадцатом году однажды демонстрация не удалась: пока сосуд несли в аудиторию, салол вдруг закристаллизовался. Причина кристаллизации так и осталась неизвестной.

В конце концов переохлажденные расплавы все-таки кристаллизуются. Кристаллизация обычно начинается, если в переохлажденную жидкость попадает маленький кристаллик того же вещества или просто пыль; вот почему жидкость можно переохлаждать только в закрытом сосуде. Иногда переохлажденный расплав закристаллизовывается и просто от сотрясения. Одно ясно: раз начавшаяся кристаллизация уже не может остановиться. Если в жидкости возник хотя бы микроскопически маленький кристаллик, то расплав уже не может оставаться переохлажденным.

Кристаллизацию переохлажденного расплава легко увидеть на опыте. Насыпьте в стеклянную колбу белый порошок водного гипосульфита натрия (фотографического «фиксажа»). Осторожно нагрейте эту колбу. Гипосульфит расплавится и превратится в бесцветную жидкость. Профильтруйте расплав в чистую

колбу, закройте ее и оставьте спокойно стоять часа два. Когда расплавленный гипосульфит остынет до комнатной температуры, введите в колбу крупинку оставшегося у вас порошка гипосульфита. Мгновенно крупинка начинает расти. Всю колбу пронизывают иголки, лучи, звезды кристаллов гипосульфита. Они быстро растут во все стороны, сталкиваются друг с другом и заполняют колбу (рис. 58). Через несколько минут вся жидкость затвердевает. Можно снова нагреть колбу, расплавить гипосульфит и повторить этот удивительно красивый опыт.

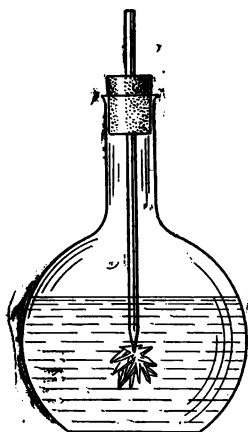


Рис. 58. Рост кристаллов гипосульфита из пересыщенного расплава.

Интересно, что как только в переохлажденном расплаве начинается кристаллизация, так сейчас же его температура снова повышается до температуры кристаллизации и затем остается постоянной все время, пока идет кристаллизация. Дотронувшись рукой до колбы с кристаллизующимся гипосульфитом, вы почувствуете, что колба сильно нагрелась, потому что едва лишь начинает кристаллизоваться переохлажденный гипосульфит, как температура его повышается до температуры кристаллизации, т. е. до  $48^{\circ}\text{C}$ .

Иногда кристаллизация переохлажденных жидкостей бывает абсолютно непредвиденной. До 1905 г. никто вообще не думал, что глицерин, очень вязкое маслянистое вещество, может закристаллизоваться. В 1905 г. профессору Зайцеву в Казани почти случайно удалось получить несколько граммов кристаллизованного глицерина. Много лет это был единственный известный случай кристаллизации глицерина. А вот в 1935 г. работники одного глицеринового завода столкнулись с неожиданным фактом: готовый к отправке и разлитый в 40 бочек глицерин вдруг весь закристаллизовался. И до того, и после на заводе десятки лет хранились бочки с глицерином, но он

никогда не кристаллизовался, а кристаллизация сорока бочек глицерина так и осталась необъясненной.

Переохлаждение может быть столь сильным, что жидкость застывает и затвердевает, так и не начав кристаллизоваться. Так образуются аморфные твердые вещества. Все они представляют собой очень сильно переохлажденные и не закристаллизовавшиеся, но затвердевшие жидкости. Поэтому их и называют часто «твердыми жидкостями». Такое состояние неустойчиво, и с течением времени аморфные вещества кристаллизуются.

Жюль Верн использовал знакомство с явлением переохлаждения воды в своем фантастическом романе «Гектор Сервадак», в эпизоде, где люди, унесенные на обломке Земли при столкновении с кометой, ждут замерзания моря, которое они называли Галльским морем.

«Несмотря на низкую температуру, море еще не замерзло. Это происходило от его абсолютной неподвижности: ни одно дыхание не возмущало его поверхности. В этих условиях вода может охладиться на несколько градусов ниже нуля и не замерзнуть, но незначительный толчок может обратить ее в лед.

Маленькая Нина и ее друг Пабло также поспешили явиться на собрание.

— Милая девочка, — сказал капитан Сервадак, — сумеешь ли ты бросить в море кусок льда?

— Ну, конечно! — ответила девочка. — Но мой приятель Пабло сумеет бросить гораздо дальше.

— Ничего, попробуй! — продолжал Гектор Сервадак, вкладывая маленький кусочек льда в руку Нины. И прибавил: — Вот погляди, Пабло, какая волшебница наша маленькая Нина.

Нина примерилась, взмахнула рукой два-три раза и бросила кусок льда в спокойную воду.

Тотчас же послышалось хрустение, которое, казалось, наполнило весь воздух и простиралось до самых пределов горизонта.

Галльское море замерзло сразу на всем своем протяжении».

В фантастических романах, конечно, случаются и не такие чудеса. В действительности же ни море, ни озеро не может переохладиться, потому что в воздухе

над ними всегда носятся пылинки кристаллов. Кроме того, даже сильно переохлажденная вода не может замерзнуть вся сразу: для замерзания целого моря потребовалось бы все же некоторое время.

### Как кристаллы растут из паров

Не приходилось ли вам видеть, как в комнате идет снег? Если зимой в морозную погоду внезапно распахнуть дверь или приоткрыть окно на улицу из сырого и очень жарко натопленного помещения, то в тех местах, куда врывается холодный воздух, начинает падать снег.

Такой случай описан даже в «Санкт-Петербургских ведомостях» за 1773 г. В зимний вечер в одном из богатых домов Санкт-Петербурга происходила ассамблея (вечер-бал). В помещении скопилось очень много народа, и стало так жарко и душно, что присутствующие начали падать в обморок. Форточек в окнах тогда еще не делали. Поэтому одному из присутствующих пришлось шпагой выбить стекло в окне. От ворвавшегося морозного воздуха во всем помещении пошел хлопьями густой снег.

А причина была в том, что от дыхания собравшихся в зале людей скопилось множество водяных паров; когда через выбитое окно внезапно ворвался холодный воздух, эти пары очень быстро охладились и затвердели, образовав кристаллики снега.

Поэтому же на сильном морозе «пар идет из рта». Это кристаллизуются белым инеем пары, выдыхаемые человеком. Ресницы, усы, бороды людей на морозе покрываются инеем: это — тоже налет снежных кристаллов.

На крышке чайника или кастрюли можно увидеть, как пары воды, попадая на холодную поверхность, сгущаются в капли жидкой воды. Если же температура ниже нуля, то водяной пар, охлаждаясь, переходит не в жидкое, а сразу в твердое состояние, т. е. в кристаллики льда.

Облака на небе — это не что иное, как скопления таких ледяных кристалликов или же капель воды, образовавшихся из паров воды, поднимающихся с земли.



Когда солнце затянуто тонкой пеленой высоких перистых облаков, на небе нередко можно увидеть так называемые «галó» — световые дуги, кольца, венцы и даже несколько солнц (рис. 59). Иногда полыхает на небе огромный светящийся столб, и даже

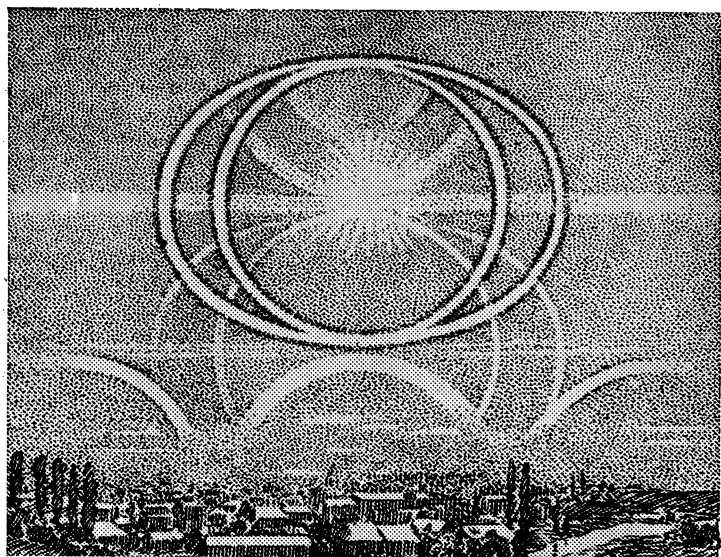


Рис. 59. Светящиеся круги вокруг солнца (галó) возникают из-за преломления и рассеяния света на гранях ледяных кристалликов в облаках.

несколько столбов, похожих на кресты или на рыцарские мечи.

Суеверный ужас рождали эти «небесные знамения» в старину.

...«Наступило ненастье, — повествуется в «Слове о полку Игореве». — Черные тучи поползли по небу, и четыре солнца засияли над русской землей. Быть большой беде, — говорили воины, глядя на это чудо...»

В Псковской летописи XVII в. читаем: «В 7293 г. \*) явилось знаменье в знаменитом граде Ярославле.

\*) То есть в 1685 г. н. э.

С. утренняя часов стоял... круг до полудня с тремя солнцы, и при сих к полудни явился второй круг, в нем крест с короною, и солнце мрачное и под большим кругом явилось подобно радуге». И здесь же приведен рисунок галó (рис. 60), каким представлялось оно напуганному очевидцу.

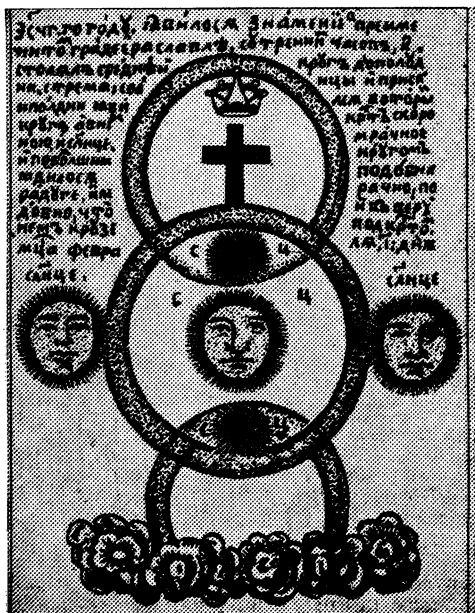


Рис. 60. Рисунок галó из Псковской летописи XVII в.

А когда 21 апреля 1551 г. в Магдебурге засияли на небе сразу три солнца и три радуги, германский император Карл VI счел это столь грозным предзнаменованием, что тут же отозвал свои войска от Магдебурга, который он перед тем держал в осаде более года. Забавно, что жители Магдебурга истолковали «небесное знамение» по-иному: не менее уstraшенные, они сочли его предвестником гибели города.

Но никакие несчастья или предзнаменования с галó не связаны. Происхождение дуг, кругов,

крестов сходно с происхождением радуги. Радуга образуется, когда лучи солнца преломляются в каплях воды после дождя, а галó — при отражении и преломлении световых лучей на гранях ледяных кристаллов.

Преломляясь и отражаясь на гранях ледяных кристалликов, свет «играет», как на гранях драгоценного бриллианта. Форма, которую придают драгоценному камню при огранке, не случайна. Она подбирается так, чтобы каждый луч света, вошедший в граненый камень, после преломления и отражения в

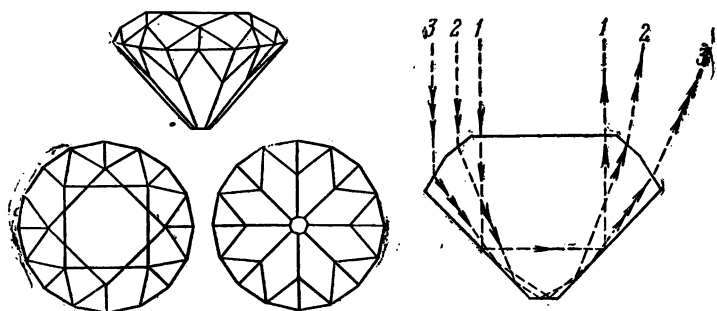


Рис. 61. Ход лучей света в граненом алмазе.

других гранях повернул бы обратно и попал в глаз человека (рис. 61). Поэтому граненый камень всегда отражает свет и «играет», как бы его ни освещали. Отблески света яркие и многочисленны и непрерывно меняются, если поворачивать камень.

В естественном многогранном кристалле и в искусственно ограненном камне белый свет, преломляясь, разделяется на несколько цветных лучей. Поэтому кажется, что из граненого камня выходят разноцветные лучи, играющие всеми цветами спектра. При огранке камня ему придают форму, наилучшую для игры света. Для этого существуют свои приемы и расчеты. Иногда при огранке, стачивая ненужные углы, приходится жертвовать почти половиной камня.

Известны случаи, когда после огранки оказывалось, что форма подобрана неудачно, и приходилось перегранивать камень. При этом, конечно, камень терял в весе, но зато выигрывал в красоте, так как игра цветов в нем делалась ярче и живее.

Алмаз считается самым красивым из драгоценных камней именно благодаря чудесной игре света в нем. Большие алмазы гранят так, чтобы они совсем не пропускали света сверху вниз. Если посмотреть сквозь большой бриллиант (ограненный алмаз) на свет снизу (со стороны большой грани), то прозрачный, как вода, камень покажется непрозрачным, черным. Все лучи, падающие на лицевую сторону бриллианта, преломляются в его гранях, разлагаются на составные цвета и возвращаются. Поэтому бриллиант так чудесно играет яркими цветными искрами.

Своеобразные явления, связанные с отражением и преломлением света, можно наблюдать и на естественно ограненных кристаллах. Примером могут служить фотографии, снятые академиком А. В. Шубниковым таким образом, что пучок света был пропущен сквозь многогранный кристалл, а за кристаллом стояла фотографическая пластинка (рис. 62). Входя в кристалл и выходя из него, свет преломляется на разных гранях. Поэтому на фотографической пластинке остался след не одного луча, а многих; узоры получились очень правильными и симметричными, потому что грани в кристалле расположены симметрично. Узоры похожи на рентгенограммы кристалла — ведь те тоже получаются из-за отражения рентгеновских лучей на атомных «зеркалах».

Так возникают и удивительные световые узоры на небе.

Высоко в атмосфере плавают множество отдельных кристалликов или их скопления, образующие перистые облака. Каждый кристаллик преломляет и отражает солнечные лучи подобно зеркалам и призмам. От числа кристалликов, от их расположения и от их формы зависят формы галб. Так, светлый столб образуется при отражении света от ледяных пластинок, плавающих горизонтально, а ложные солнца — при преломлении на шестигранных столбиках.

Когда кристаллики замерзшей воды в облаках вырастают, они становятся тяжелее и в конце концов падают на землю: идет снег.

В узорных звездочках всегда по шесть лучей, но нельзя найти двух совершенно одинаковых звездочек. Почему столь разнообразны их формы? Это

зависит от того, как образуются и растут снежинки. Звездочки снежинок бывают всего красивее и правильнее, когда воздух сухой и ветра нет. Если подует теплый влажный ветер, на краях снежных звездочек,

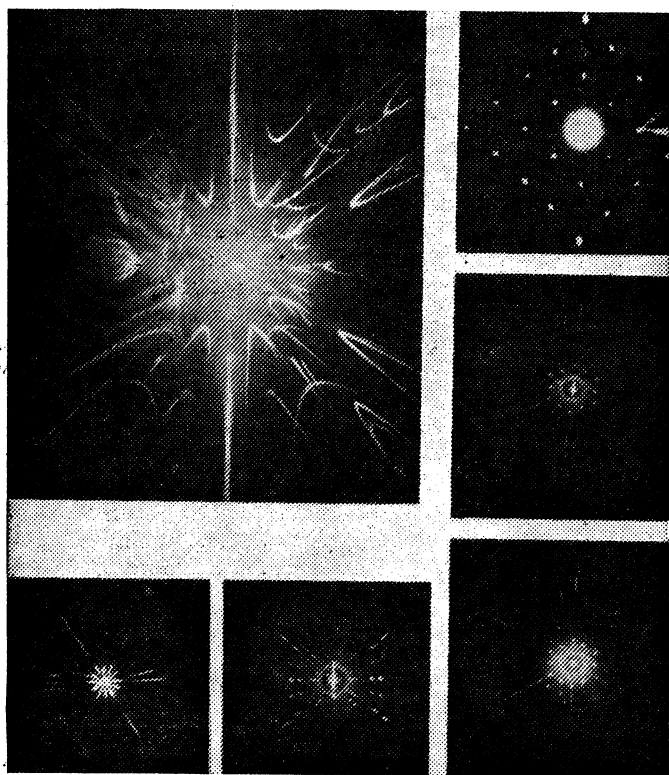


Рис. 62. Световые фигуры, полученные А. В. Шубниковым при пропускании света через естественные многогранные кристаллы.

Симметрия фигуры соответствует симметрии кристалла.

как мельчайшие бусинки, нарастают водяные капли. Во влажном воздухе снежинки закругляются с краев, теряют свою форму, слипаются в снежные хлопья. Снежинка — необычайно нежный, хрупкий кристаллик; каждое дуновение ветра, всякое ничтожное колебание температуры или влажности оставляет свой

след на форме снежинок. Своей формой снежинка рассказывает свою историю: где она образовалась, как росла, через какие слои воздуха пролетала, прежде чем плавно спуститься на землю.

Каменные кристаллы тоже разнообразны, и на каждом камне можно прочесть следы его истории. Среди камней вы не встретите двух совсем одинаковых. Но камень меняется медленно. Нужны многие годы, века или тысячелетия, чтобы изменить его облик. Поэтому подметить и объяснить разнообразие форм у камней труднее, чем у снежинок, которые вырастают, меняются и погибают в течение минут.

Кристаллизоваться могут не только водяные пары, но и пары других веществ. Образование кристаллов из паров можно постоянно видеть в громадных «природных лабораториях» — вулканах. Временно бездействующие и совсем потухшие вулканы часто, как говорят, «курятся» — из них непрерывно выходят струйки дыма: это те вещества, которые достигли поверхности земли в виде паров, а не расплавов или растворов. Выделяясь из кратеров вулканов или из трещин вблизи вулканов, пары оседают на стенках и на земле, сгущаясь, затвердевая и закристаллизовываясь. Так образуются кристаллические корочки и налеты самородной серы, сернистых металлов, каменной соли и других минералов.

Известен случай, когда при извержении вулкана Везувия в Италии за десять дней из паров образовалась жила кристаллического гематита (железного блеска) мощностью в метр.

Так же кристаллизуются на стенках металлургических печей пары, выделяющиеся из расплавленного металла.

### Кристаллы в облаках

Кристаллики льда, причудливыми узорами которых мы любуемся в снежинках, могут в несколько минут погубить самолет. Обледенение — страшный враг самолетов — тоже результат роста кристаллов.

И здесь мы также имеем дело с ростом кристаллов из переохлажденных паров. В верхних слоях атмосферы водяные пары или капли воды могут долго сохраняться в переохлажденном состоянии.

Переохлаждение в облаках доходит до  $-30^{\circ}\text{C}$ . Но как только в эти переохлажденные облака врывается летящий самолет, тотчас же начинается бурная кристаллизация. Мгновенно самолет оказывается облепленным грудой быстро растущих кристаллов льда.

Прославленный советский летчик В. П. Чкалов рассказывал в своих воспоминаниях, как ему пришлось бороться с обледенением самолета во время исторического первого перелета через Северный полюс в Америку в 1935 г.

«Я уже восемь часов просидел за штурвалом. Впереди еще много тяжелых невзгод. Нужно сохранить силы. Разбудил Егора (Байдукова). Я свободен. Правда, относительно. Каждую минуту нужно быть наготове. Прилег, закурил трубку. Беляков передает в Москву наши координаты. Вдруг крик Егора. Что такое? В чем дело? Вскочил, смотрю — на стекле и на крыльях лед. Мотор затрясся, стал вибрировать.

— Давай скорее давление на антиобледенитель! — закричал Егор \*).

Я начал качать насосом. Егор открыл каплеуловитель, и солидная струя спиртовой жидкости быстро очистила винт от льда. Самолет стал спокойнее.

Оказалось, что самолет попал между двумя слоями облачности и стал обледеневать.

Егор правильно ориентировался, дал полный газ мотору, и самолет медленно, метр за метром, набирал высоту: 2200—2300—2400—2500 метров. Уже появилось солнце. Конец облачности».

Но снова коварные кристаллы льда подстерегали краснокрылый самолет. «...Циклон решительно наступает развернутым фронтом. ...Сантиметровый слой льда покрыл почти весь самолет. Лед абсолютно белого цвета, как фарфор. Фарфоровое обледенение — самое страшное. Лед необычайно крепок. Достаточно сказать, что он держится в течение шестнадцати часов, не оттаивая...

...Переднее стекло еще больше обледенело. Егор, просунув руку сквозь боковые стекла кабины, стал срубать финкой лед...»

---

\*) Антиобледенитель — насос, омывающий лопасти винта самолета жидкостью, на которой лед не кристаллизуется.

Было это 40 лет назад. Теперь разработаны эффективные средства борьбы с обледенением самолетов. Более того, теперь научились кристаллизовать и «выжимать» облака по воле человека. Мы уже знаем, что в переохлажденных жидкостях или в паре, в которые попала кристаллическая затравка, мгновенно начинается и очень быстро идет кристаллизация. В верхнюю, переохлажденную часть облака забрасывают с самолета или выстреливают из пушки пылинки иодистого свинца или иодистого серебра. У этих веществ структура сходна со структурой льда, так что кристаллики льда начинают расти на пылинках, как на своих собственных зародышах. На каждой пылинке начинают конденсироваться пары воды — возникают ледяные кристаллики. Растут они очень быстро, становятся тяжелыми и падают сквозь облако, выпадая на землю снежинками или же каплями дождя, если по дороге они успевают растаять в теплой, нижней части облака. Так борются с лесными пожарами или освобождают от туманов аэродромы, вызывая искусственный дождь.

Так объявлена война крупному граду, безжалостному врагу садов, виноградников, полей. Борьба с градом ныне ведется так: радиолокатор нащупал градовое облако, нажата пусковая кнопка ракетной установки, огненным залпом заброшены в небо пылинки иодистого серебра — сразу начинается рост мириадом мелких кристалликов, и в несколько мгновений «растстрелян» накапливавшийся град.

### **Кристаллы и живые организмы**

Был такой случай в Англии, когда врачи, оперируя одного больного, нашли у него во внутренних органах хорошо ограненный кристаллик величиной с горошину. Конечно, было очень интересно узнать, образовался ли этот кристаллик в организме больного или больной нечаянно проглотил его. Врачи обратились в кристаллографическую лабораторию. Кристаллографы определили, что это — кристалл салолла, выросший во внутренних органах больного из лекарства, которое он принимал,



Желчные камни в печени, камни в почках и мочевом пузыре, мельчайшие отложения в сосудистой оболочке глаза, вызывающие серьезные болезни человека, представляют собой кристаллы.

В клетках, из которых построены растения, постоянно встречаются прекрасно ограненные кристаллики, настолько мелкие, что их едва можно различить в микроскоп. В клетках картофеля можно найти кристаллы белковых веществ, в некоторых водорослях — кристаллы гипса. И даже в простейшем животном организме — в амебе — имеются кристаллики щавелевокислого кальция.

Некоторые живые организмы представляют собой настоящие «фабрики» кристаллов. Кораллы, например, образуют целые острова, сложенные из микроскопически мелких кристалликов углекислой извести. Обширные залежи кристаллической селитры в прибрежных местностях Перу, Боливии и Чили образовались главным образом в результате переработки животных остатков бактериями.

Драгоценный камень жемчуг тоже построен из мелких кристаллов, которые вырабатывает моллюск жемчужница. Если в раковину жемчужницы попадает песчинка или камешек, то моллюск начинает откладывать перламутр вокруг пришельца. Слой за слоем нарастает на песчинке перламутр, образующий шарики жемчуга.

В Китае, где особенно развит жемчужный промысел, в раковины жемчужных моллюсков вкладывают жестяные изображения Будды, мелкие изделия из кости, металла; через несколько лет эти изделия покрываются слоем перламутра.

В Японии имеются специальные питомники жемчужных раковин, где в бухтах, защищенных от морских бурь, в тиши «работают» многие тысячи моллюсков. Раковины опускают в море в больших проводочных клетках. В клетке заключена сотня раковин жемчужниц. Клетки вытаскивают на поверхность воды лишь один-два раза в год. В каждую раковину вложен перламутровый шарик — зародыш будущей жемчужины. Моллюск откладывает слои перламутра вокруг шарика, и через 7—10 лет извлекают из его раковины готовую жемчужину.

Раковины жемчужницы можно найти в водах Советского Союза, главным образом на Дальнем Востоке и в северных реках.

В воде различных водоемов, в болотистых местах часто встречаются колонии микроорганизмов (серобактерий), которые поглощают из воды сероводород, образующийся при гниении остатков животных и растений, разлагают его на водород и серу и отлагают серу в своих телах. Эти бактерии микроскопически малы, но их так много, что в местах их работ накапливаются значительные количества самородной серы.

Сероводород всегда выделяется при гниении организмов, и если рядом есть металл, с которым он может соединиться, то в результате химических реакций образуются мелкие кристаллики серного колчедана (сернистого железа) или медного колчедана — халькопирита (соединения железа и меди с серой). Эти кристаллики заполняют все пространство, в котором находился гниющий организм, иногда полностью повторяя его форму, так что образуется как бы слепок этого организма, состоящий из мельчайших кристалликов колчедана. Обычно так «закристаллизовываются» небольшие организмы — мелкие растения, раковины. Но иногда бывают удивительные случаи.

Около шестисот лет назад некий рудокоп провалился в глубокий колодец в железных рудниках Фалуна (Швеция). Только через шестьдесят лет, когда невеста погибшего стала уже бабушкой, добрались, постепенно углубляя рудник, до того места, куда попал рудокоп. Оказалось, что его тело за это время целиком превратилось в серный колчедан, масса мелких кристалликов которого образовала как бы слепок с фигуры человека (рис. 63). Превращенное в кристаллы серного колчедана тело рудокопа хранилось в течение семи лет в Фалунском горном управлении. Впоследствии оно рассыпалось, потому что серный колчедан на воздухе разлагается.

С одним английским химиком, который годами не убирал своей лаборатории, произошел забавный случай. Однажды, когда по прошествии многих лет он стал приводить лабораторию в порядок, в одном большом стакане с раствором железного купороса он нашел... мышь, превратившуюся в массу кристалликов

серного колчедана, полностью воспроизводящую форму ее тела. Процесс тут таков же, что и в земле: мышь, издохшая в стакане с железным купоросом,



Рис. 63. «Пиритовый человек». Со старинной шведской гравюры. (Из книги И. И. Шаfranовского «Симметрия в природе», Л., 1974.)

разлагалась, выделяя сероводород: происходила химическая реакция и вырастали кристаллики серного колчедана.

Растительные и животные организмы могут превращаться в кристаллы не только серного колчедана, но и других веществ. Так, например, стволы древних деревьев, миллионы лет пролежавшие в земле, часто постепенно заполняются очень мелкими (даже в микроскоп неразличимыми) кристалликами окиси кремния: эти деревья, как говорят, «окремневают» или «окаменевают». В таких окаменелых деревьях ясно видны все жилки, свойственные дереву; в то же время этот кусок дерева уже тверд, как камень.



Рис. 64. Заповедник окаменелого леса. Аризона, США,

Громадные окаменелые стволы с корнями и ветвями нередко встречаются на склонах гор близ Ахалцыха в Закавказье. Возле города Кирова на полях тоже часто находят окаменелые деревья. Местные жители называют их «чертовым дубом».

В США в Аризоне, есть заповедник окаменелого леса (рис. 64); Илья Ильф и Евгений Петров так описали его в своей книге «Одноэтажная Америка»:

«Мы въехали в огороженный колючей проволокой заповедник окаменелого леса. Сперва мы не заметили ничего особенного, но, взглядевшись попристальнее,

увидели, что из песка и щебня торчат пни и лежат стволы деревьев. Пройдя поближе, мы рассмотрели, что и щебень представляет собой мелкие частицы окаменевшего леса. На этом месте несколько десятков миллионов лет тому назад рос лес. Не так давно лес этот нашли в виде поваленных окаменевших стволов. Это поразительное зрелище — посередине пустыни в великой тишине лежат стволы деревьев, сохранившие внешность самых обыкновенных стволов красно-коричневого цвета.

В заповеднике выстроен маленький музей, где препарируют чурбанчики окаменевшего дерева. Их распиливают и полируют. Поверхность среза, сохраняя все линии дерева, начинает сверкать красными, синими и желтыми жилками. Нет таких мраморов и малахитов, которые могли бы соперничать по красоте с отполированным окаменевшим деревом. В музее нам сказали, что этим деревьям сто пятьдесят миллионов лет.

Заповедник окаменевшего леса тщательно охраняется, с собой нельзя брать ни одной песчинки. Но лишь только мы выбрались за пределы заповедника, как увидели газолиновую станцию, обнесенную забором из наваленных кое-как окаменевших деревьев. Тут же шла бойкая торговля кусочками дерева по пятнадцати центов и выше. Какой-то кустарь-одиночка с мотором, гудевшим на всю пустыню, лихо-радочно выделывал сувениры — брошки и браслеты, пилил, точил и полировал.

Стоило ли лежать столько миллионов лет, чтобы превратиться в некрасивую брошку с надписью: «На добрую память»!»

### Включения в кристаллах

Когда кристаллизация происходит слишком быстро, растущий кристалл захватывает не только частички своего вещества, но и вообще все, что встретится ему на пути в растворе; он ведет себя, как очень голодный человек, готовый проглотить без разбора все, что ему попадается. То же самое происходит, если кристалл растет в загрязненном растворе или расплаве. Так вырастают мутные, нечистые кристаллы, внутри

которых включены пузырьки газа, капельки жидкости, частицы твердых тел, иногда даже целые кристаллики другого вещества.

В природных кристаллах очень часто встречаются включения других минералов — так называемые «ми-

нералы-узники». Например, среди кристаллов природного сапфира издавна известны так называемые «звездчатые сапфиры», у которых на синем фоне видна трехлучевая или шестилучевая звездочка с жемчужным отливом. Эта звездочка получается благодаря отражению луча света от массы мельчайших включений, расположенных параллельно друг другу в кристалле сапфира. Такие же звезды можно увидеть и в других кристаллах с включениями, например в розовом кварце, в слюде.

«Солнечным камнем» называются прозрачные полевые шпаты с включениями тончайших кристаллических пластинок или чешуек окиси железа и других минералов. На свету поверхность солнечного камня загорается



Рис. 65. Флакон из «волосатика», т. е. горного хрусталя с включениями игольчатых кристаллов рутила. Китайская работа, XVIII в., Государственный Эрмитаж.

чудесным теплым отблеском; это отражают свет мельчайшие включения, расположенные параллельно.

В кварце можно встретить включения самых различных веществ. Образцы кварца с включениями черных, похожих на стрелки кристалликов рутила (окиси титана) называли в прошлом веке «стрелами Амура». Тогда же дали название «волосы Венеры» кварцу с золотистыми иглами рутила; его также называют «волосатиком» (рис. 65). Если же в кристалле очень

много волосков асбеста, то кварц приобретает красивый шелковистый отлив; тогда его называют «кошачьим глазом». В кварце можно встретить зеленые чешуйки хлорита, кристаллики железного блеска, пузырьки газов, капельки нефти и другие включения.

Кристаллы гипса из окрестностей станции Репетек в Кара-Кумах поглощают при росте столько песка,

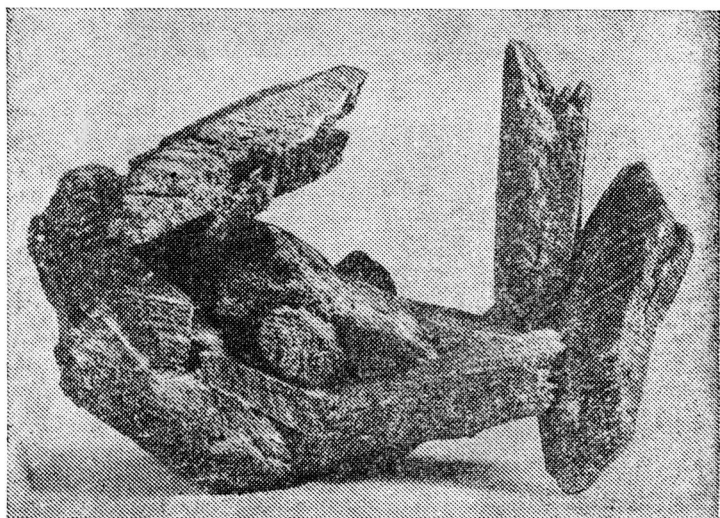


Рис. 66 Кристаллы гипса, поглотившие в процессе роста много песка. Репетек, Кара-Кумы.

что вся поверхность кристалла становится похожей на наждачную бумагу или на щетку (рис. 66). Туркмены издавна пользуются репетекскими гипсами для чистки бараньих шкур, для расчесывания шерсти, для чистки и правки ножей.

По включениям можно восстановить историю кристалла, узнать, в какой среде и в каких условиях он рос. Советский кристаллограф Георгий Глебович Леммлейн показал, что если на кристалле во время его роста почему-либо образуется трещина или еще какой-нибудь изъян, то часто бывает, что при

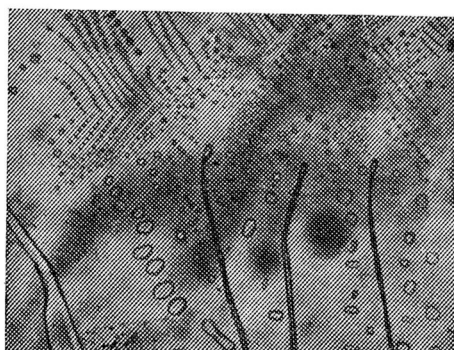


Рис. 67. Образование жидких включений при заживлении трещины в кристалле селитры. Микрофотографии с одного и того же участка кристалла сняты с промежутками в 30 секунд.



дальнейшем росте раствор как бы склеивает трещину, «залечивает» ее. Но при этом в уголках, в тонких боковых трещинах остаются запертыми частицы раствора. Так в кристалле появляются включения жидкости.

На рис. 67 показаны сделанные Г. Г. Леммлейном последовательные микрофотографии, изображающие залечивание трещины в кристалле селитры. Извилистые каналы на фотографии — это трещины в

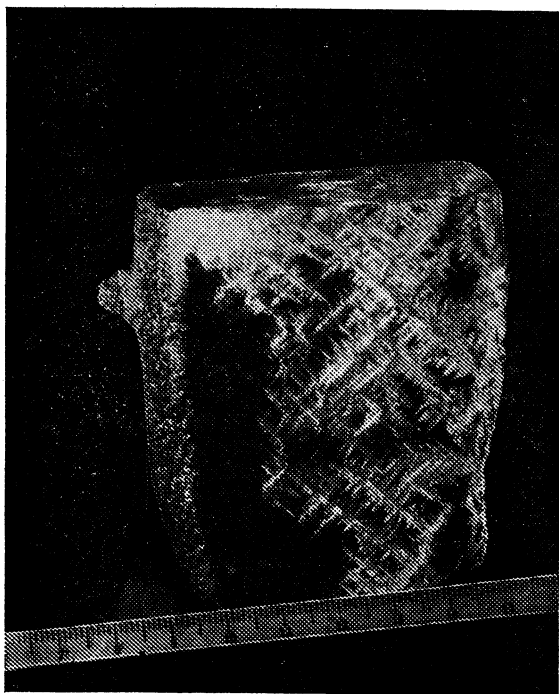


Рис. 68. «Отрицательные кристаллы» в кристалле фтористого лития. Фото В. А. Мокиевского.

кристалле, заполненные раствором селитры. Видно, что на конце трещины и в ее боковых каналах появляются перемычки, как бы отшнуровывающие малые включения; постепенно вся трещина, залечиваясь,

распадается на ряд отдельных жидких включений. По ним легко можно найти следы залеченной трещины.

Жидкие включения могут также образоваться, если кристалл при росте захватывает капельки раствора или какой-нибудь другой жидкости. Интересно, как такая капелька, попавшая внутрь кристалла,

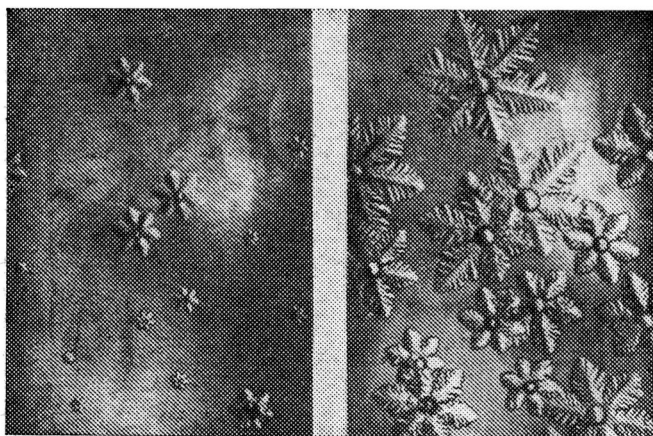


Рис. 69. «Ледяные цветы» — отрицательные кристаллы в толще льда.

устанавливает себе помещение. При нагревании она растворяет кристалл изнутри, а при охлаждении растворенное вещество снова оседает; и вот оказывается, что при колебаниях температуры капелька, таким образом, выедает многогранную пещерку, точно повторяющую форму кристалла. Получается как бы внутренний отпечаток кристалла; его называют «отрицательным кристаллом» (рис. 68).

Если поместить кристалл квасцов под струю воды, то, помимо наружного растворения, вода проникает внутрь кристалла по мельчайшим невидимым трещинам и растворяет его изнутри. Через несколько минут весь кристалл оказывается усеянным «отрицательными кристаллами» — пещерками с многогранными

стенками, в точности повторяющими исходную форму кристалла (конечно, при этом кристалл растворяется еще и снаружи).

Эти отрицательные кристаллы часто видны во льду: когда под действием лучей весеннего солнца лед начинает плавиться, внутри него образуются отрицательные кристаллы, так называемые «ледяные цветы» — пещерки, похожие по форме на снежинки (рис. 69). Зародышами таких «цветов» служат пылинки, пузырьки воздуха, включенные в толщу льда. При массовом образовании ледяных цветов в ясный солнечный день на горном склоне слышен иногда «шепот снега»; звуки, похожие на шипение, треск, шорох, говор далекой толпы — это массовое образование ледяных цветов, иногда с пустотами в центре, приводящее к разрыву кристаллов льда.

В кристаллах каменной соли, имеющих форму кубиков, капельки жидкости всегда оказываются в кубических же пустотах. Иногда в каменной соли внутри такого включения жидкости заключен еще и пузырек газа, и можно видеть, как при поворачивании куска соли этот пузырек перемещается то вверх, то вниз, подобно пузырьку воздуха в ватерпасе.

В некоторых месторождениях встречается так называемая «трескущая каменная соль». При растворении или при небольшом разогревании такая соль с треском разлетается на кусочки. Это происходит оттого, что в соль включены пузырьки углекислого газа, который, нагреваясь, расширяется и с треском разрывает стенки своей «тюрьмы».

По включениям в кристаллах академик А. Е. Ферсман узнал, сколько лет кристалликам гипса из Сакского соляного озера в Крыму. В каждом из белых кристалликов сакского гипса виден ряд

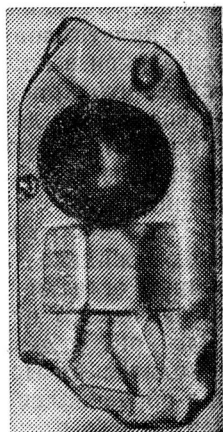


Рис. 70. «Отрицательный кристалл» в кварце. Внутри отрицательного кристалла видны пузырьки нефти и кристаллик каменной соли.

черных полосок. Сравнив кристаллики друг с другом, А. Е. Ферсман обнаружил, что промежутки между черными полосками во всех кристалликах одинаковы: все они около миллиметра. Он очень просто разгадал это явление. После весенних разливов, в начале лета, каждый год в Сакское озеро текут мутные воды, приносящие ил и грязь с окрестных гор. Эта грязь и оседает в растущих кристалликах гипса. Значит, каждая черная полоска отмечает весенний разлив. Подобно годовым кольцам на деревьях, черные полоски внутри этих кристаллов отмечали смену зимы и лета. Читая эти записи в каменной книге, академик Ферсман разгадал, что кристалликам было всего 12—14 лет, что за восемь лет до этого было холодное лето и кристаллики почти не росли, а два-три года назад лето было солнечное и жаркое и кристаллики росли без включений.

Особенное значение для исследования минералов имеют жидкие и газообразные включения. Эти плененные остатки той среды, где образовался минерал, рассказывают нам об условиях, при которых происходила кристаллизация. Так, если в жидком включении находится пузырек газа, можно полагать, что минерал образовался при высокой температуре и что в момент своего пленения включение было жидким. Когда же минерал охладился, жидкость включения, остывая, уменьшилась в своем объеме; а так как полость включения герметически закупорена, то при уменьшении объема жидкости внутри полости создалось пустое пространство, в результате чего из жидкости выделился пузырек газа. Если жидкость целиком заполняет область включения, то, очевидно, минерал образовался в холодных или теплых, но не горячих растворах.

### **А если кристалл не многогранный?**

Изменяются ли свойства кристалла, если у него обломать все углы, обточить грани, словом, лишить его многогранной формы? Конечно, нет. Ведь структура кристалла, правильный строй частиц внутри него при этом не меняются, а значит, не меняются и его свойства.

Сделаем такой опыт: возьмем не правильный многогранный кристалл, а шарик, вышлифованный из кристалла, и погрузим его в пересыщенный раствор того же вещества. Уже через несколько часов на шаре появятся крохотные ровные площадки граней; постепенно они будут увеличиваться, расширяться, встретятся друг с другом и в конце концов покроют весь шар, превратив его в многогранник.

Можно заставить расти не только кристаллические шары, но и кубики, неправильные многогранники и, наконец, просто всякие кривые обломки кристаллов, и все они, вырастая, станут правильными симметричными многогранниками, если ничто не мешает им при росте.

Уничтожив многогранную форму кристалла, мы не уничтожим его *способности самоограняться*. Очевидно, эта способность характернее для кристалла, чем сама его форма.

Кристалл не перестает быть кристаллом, даже лишившись своей многогранной формы. Его физические и химические свойства остаются неизменными. Форма кристалла определяется в первую очередь внутренним строением, т. е. расположением частиц в кристаллической решетке. Но ведь от изменения внешней формы кристалла внутреннее строение его не нарушается, поэтому-то не меняются и его свойства.

Известно, что в пересыщенном растворе кристалл растет, в недосыщенном — растворяется. А как же поведет себя кристалл в растворе точно насыщенном? Очевидно, он будет находиться в равновесии с раствором, т. е. не должен ни расти, ни растворяться. Ну, хорошо, если кристалл многогранный — такой, каким он должен быть по своей природе, тогда он так и будет оставаться в насыщенном растворе таким же многогранником. А что же случится, если раствор насыщен, а кристалл, в него помещенный, обладает формой неправильной, не присущей кристаллу?

Такой опыт был поставлен автором этой книги под руководством академика А. В. Шубникова. Идея А. В. Шубникова заключалась в следующем. Поместим в насыщенный раствор кристалл, лишенный своей правильной формы. Такой кристалл не должен сохранять свою первоначальную форму, хотя он и не

может ни расти, ни растворяться. Да, раствор насыщен. Но покоя в мире нет, атомы движутся, и в растворе и в кристалле есть движение частиц (атомов, ионов, молекул). Отдельные частицы — пусть изредка! — могут отрываться от кристалла, переходя в раствор, и, наоборот, уходить из раствора, оседая на кристалл. При этом форма кристалла неизбежно должна меняться: частицы будут отрываться от самых «неудобных» для них мест и, наоборот, оседать в местах «самых удобных». А что же удобнее для частицы на поверхности кристалла, чем места, соответствующие его плоским граням? Вот и получится, что с помощью теплового движения частицы должны в конце концов как бы перебраться по кристаллу, построив на нем плоские грани. Процесс этот, однако, пойдет бесконечно медленно. Жизни нескольких поколений не хватит, чтобы его наблюдать, — даже если предположить такой невероятный случай, что все это время раствор сохраняют строго насыщенным, т. е. температура его поддерживается всегда и неизменно строго постоянной.

— Давайте поможем кристаллу, — предложил академик А. В. Шубников (тогда, 45 лет назад, он еще не был академиком). — Давайте слегка ускорим, подтолкнем процесс, который и без нашей помощи неизбежно шел бы в природе. Для этого будем все время колебать температуру, т. е. то чуть нагревать, то так же чуть-чуть охлаждать насыщенный раствор с кристаллом. То нагреваясь, то охлаждаясь — очень близко к температуре насыщения, — раствор будет становиться то слегка пересыщенным, то слегка недосыщенным, и кристалл будет то расти, то растворяться, т. е. как бы колебаться около состояния равновесия. Вот в чем особенность этого опыта: вес кристалла в конечном счете не меняется, а форма, как оказалось, меняется.

Шарик, выточенный из кристалла алюмокалиевых квасцов, поместили во вращающийся закрытый сосуд с насыщенным раствором. Температура раствора то повышалась, то понижалась на  $1^{\circ}$  каждые три часа. Опыт, результат которого показан на рис. 71, длился непрерывно три с половиной месяца, причем в процессе опыта кристалл время от времени

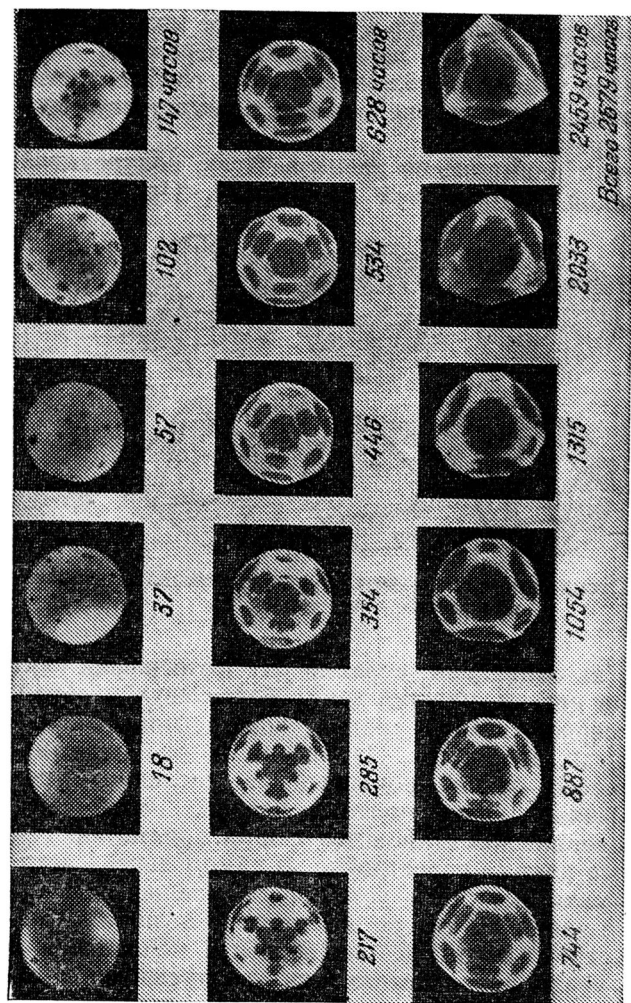


Рис 71. Квасцовый шарик, помещенный в насыщенный раствор, при слабых колебаниях температуры постепенно меняет свою форму, сохраняя вес и объем неизменными. Под каждой фотографией подписано время опыта в часах.  $\frac{1}{2}$  натуральной величины.

фотографировали и взвешивали. На фотографиях видно, что в первые же часы шарик начал одеваться плоскими гранями. Постепенно площадки этих граней увеличивались.

Подчеркнем: кристалл в этом опыте меняет свою форму только за счет перестройки, перемены мест частиц. Они уходят из положений, им несвойственных, и пристраиваются в положения, соответствующие плоским граням.

Обратим внимание на время в часах, подписанное под каждой фотографией на рис. 71. Промежутки

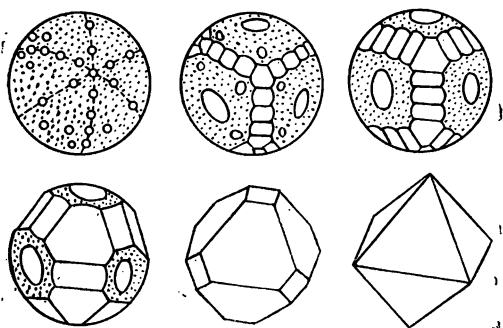


Рис. 72. Схема изменения формы кристалла квасцов в насыщенном растворе (ср. с рис. 71).

времени не одинаковы: верхний ряд фотографий снят в течение недели, нижний занял более двух месяцев. Между первой, второй, третьей фотографиями проходили сутки, двое суток. Изменения формы ясно видны. Процесс, зафиксированный на последних трех фотографиях, длился полтора месяца. Видно: чем более совершенной становится форма кристалла, тем медленнее идет ее перестройка. В самом деле! Частицы занимают все более устойчивые, равновесные положения: зачем им теперь менять свои позиции? Сначала быстро, а затем все медленнее и медленнее, но упорно, неизменно кристалл как бы стремился к одной цели: шаг за шагом менялась его форма и в конечном счете шар превратился в правильный октаэдр, а вес и объем его при этом не изменились (см. схему этого опыта на рис. 72). Последней фотографии на



рис. 71 отвечает время опыта 2459 часов, т. е. 102 дня. После этого опыт длился еще 220 часов, но форма кристалла теперь уже больше не менялась. Ведь кристалл «добился своего», он принял свою правильную, *равновесную, многогранную форму* — именно ту форму октаэдра, которая характерна для кристалла квасцов.

Такие опыты были повторены неоднократно, а результат их был всегда одинаков: если предоставить кристаллу благоприятную возможность, он обязательно примет многогранную равновесную форму, даже если начальная форма его была совсем ему не свойственной. Значит, способность самоограничаться заложена в атомной структуре кристалла.

### **А все-таки почему многогранник?**

Почему же все-таки кристаллы вырастают многогранными?

Здесь проявляется одна из самых основных особенностей кристалла — *анизотропия* его физических свойств. Анизотропия — это неодинаковость физических свойств вещества в разных направлениях (при этом в симметричных направлениях свойства могут оказаться одинаковыми).

Бросьте в воду камень — от камня расходятся круги, потому что вода изотропна: волны распространяются в ней во все стороны с одинаковой скоростью. Посмотрите на далекий огонек: свет от него расходится во все стороны одинаково, по радиусам сферы, потому что воздух — среда изотропная.

Не так обстоит дело в анизотропном кристалле. Свет в нем расходится не по кругам, а по эллипсам. Твердость, электропроводность, упругость кристалла — почти все физические свойства — в разных направлениях различны. Впрочем, вы этого не можете не знать! Возьмите слюду, слоистый кристаллический минерал: слюду легко пальцами расщепить в одном направлении на тоненькие прозрачные листочки, но крайне трудно не то что пальцами, но даже ножом разрезать поперек, потому что прочность кристаллов по разным направлениям различна. Кристалл раскалывается по тем направлениям, где прочность всего

меньше. Этим свойством слюды широко пользовались раньше, когда еще не умели делать большие стеклянные пластины. Прозрачные листы слюды вставляли в окна вместо стекла (рис. 73).

Лучшая прозрачная слюда для окон вывозилась в Западную Европу из России. Белая слюда и сейчас

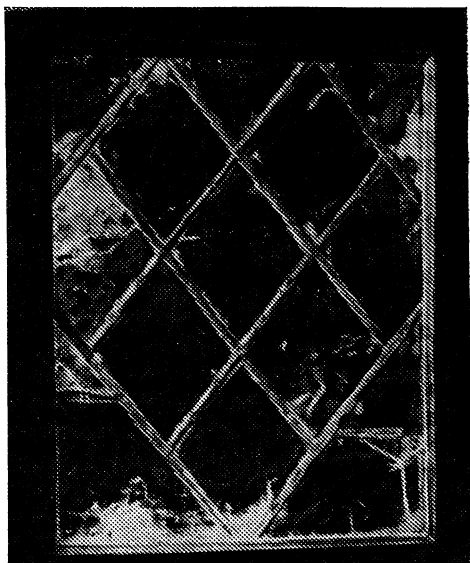


Рис. 73. Окно времен Ивана Грозного из пластинчатых кристаллов слюды, скрепленных свинцовыми перекладинами.  $\frac{1}{4}$  натуральной величины.

называется «мусковит», от слова «Московия», как тогда называли Россию.

Академик А. Е. Ферсман повествует, что еще во времена гражданской войны под Оренбургом вместо стекла для окон пользовались большими листами прозрачного кристаллического гипса. Гипс тоже легко расщепляется на тонкие пластины из-за анизотропии его прочности.

Если ударить острием ножа или молотком по кубу каменной соли, он расколется не на кривые

обломки, а на правильные кубики или параллелепеды с прямыми углами и плоскими гранями.

В истории кристаллографии известен забавный случай: французский кристаллограф, аббат Рене Жюст Гаюи (1743—1826), пытливый естествоиспытатель и наблюдатель, еще в начале прошлого века много размышлял о том, каково внутреннее строение кристаллов. Рассказывают, что однажды, находясь

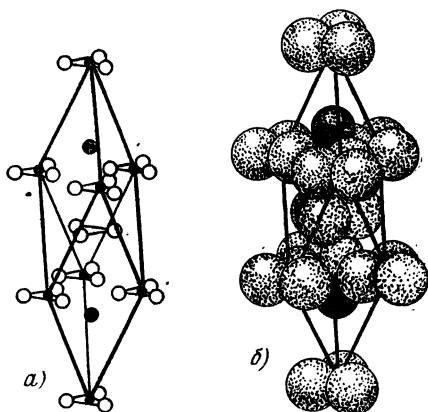


Рис. 74. Схема (а) и модель (б) структуры кристаллов кальцита (исландского шпата); жирными линиями выделена форма ромбоэдра.

в гостях у знакомого любителя камней, Гаюи нечаянно уронил прекрасный кристалл прозрачного кальцита (исландского шпата). (Структура кристаллов исландского шпата и их форма, так называемый ромбоэдр, показаны на рис. 74.) Велико было огорчение Гаюи: кристалл разбился вдребезги. Но еще больше было его изумление, когда оказалось, что все осколки точно повторяют форму разбитого кристалла. Каждый из осколков оказался тоже ромбоэдром. Тогда Гаюи уже нарочно разбил один из осколков на еще более мелкие осколки: маленький ромбоэдр, который он бросил на пол, раскололся по ровным плоскостям опять на такие же ромбоэдры!

Биографы Гаюи утверждают, что аббат воскликнул при этом: «Все найдено!», увидев подтверждение

давно назревшей в его уме гипотезы о строении кристаллов. Повествуют также, что, возвратясь домой, Гаюи в тот день разбил все кристаллы кальцита из своей коллекции, снова и снова убеждаясь, что, какими бы они ни обладали разнообразными формами, разбивались они всегда по ровным плоскостям на правильные ромбоэдры.

Гаюи решил, что, разбивая кристалл на все меньшие и меньшие осколки, можно в конце концов дойти до элементарных частиц и что эти частицы должны иметь форму таких же многогранников. По мысли Гаюи, такие мельчайшие кирпичики, складываясь вместе, образуют многогранный кристалл. Тщательно разбирая все способы, какими могут складываться друг с другом кирпичики-частицы, Гаюи вывел различные формы кристаллов.

Многие современники Гаюи обзывали его «кристаллокластом», т. е. «раскалывателем кристаллов», и высмеивали его основную идею о том, что кристалл сложен из правильно чередующихся мельчайших частиц.

Однако идея Гаюи правильно предвосхитила современные представления о строении кристаллов. Теперь мы знаем, что частицы, образующие кристалл, располагаются в пространстве правильными рядами, сетками, решетками.

Чтобы полностью представить себе структуру кристалла, надо знать относительные размеры атомов, из которых он сложен, расстояния и силы связи между ними, их взаимное расположение и законы симметричных преобразований, повторяющих это расположение в пространстве.

Основной характерной особенностью структуры кристалла является *симметрия*.

Взглянем на модель структуры кристалла. Не ясно ли, например, что в структуре исландского шпата (рис. 74) выделяются атомные плоскости, образующие ромбоэдр? По этим плоскостям легче всего расколоть кристалл.

В структуре слюды (рис. 75) ясно видны плоскости, по которым кристалл должен оказаться гораздо менее прочным, чем во всех остальных направлениях. По ним-то и расщепляется слюда на тонкие листочки.

Иначе говоря, причиной анизотропии прочности слюды является ее атомная структура.

Подобным же образом можно объяснить анизотропию других физических свойств кристалла.

Твердость кристаллов тоже зависит от направления. Это легко увидеть, если поцарапать каким-нибудь острием грань кристалла. По одним направлениям царапать легче, чем по другим, и царапины получаются разной длины и ширины. Например, продолговатые голубые таблички кристаллов уральского минерала кианита по одним граням легко царапаются просто ногтем, а на других гранях даже хороший стальной нож не оставляет никакого следа.

У алмаза твердости разных граней относятся друг к другу как  $1:2:13$ , т. е. можно выбрать направления, различающиеся по твердости вдвое и даже в 13 раз!

Этим широко пользуются, когда гранят алмазы. Мы уже рассказывали о знаменитом алмазе «Шах», которым уплатили за жизнь автора «Горе от ума». На этом камне вырезаны мелкие буквы, весь он испи-сан тонкой арабской вязью.

Это кажется загадкой: как и чем можно вырезать буквы на алмазе, если алмаз — самый твердый из всех камней на Земле? Лишь теперь созданы сверх-твердые сплавы, превосходящие по твердости даже алмаз, но в руках древних мастеров, гранивших «Шах», не было ничего, кроме алмаза. Как же процарапали они надпись на алмазе? Видимо, опытный мастер использовал именно анизотропию твердости. Он гранил алмаз алмазом, выбирая самые твердые направления у одного и те, что легче всего поддаются резу, — у другого.

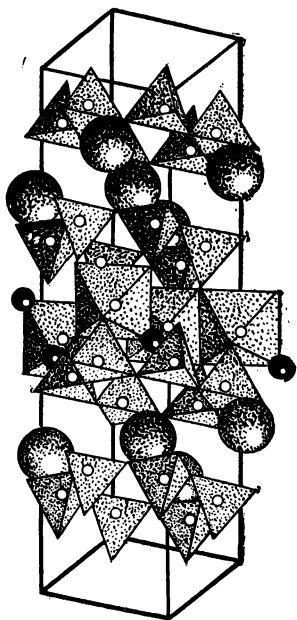


Рис. 75. Структура слюды по Н. В. Белову.

Почти все физические свойства кристаллов анизотропны. Анизотропна и скорость роста кристалла. Кристаллы вырастают в форме многогранников из-за анизотропии скоростей роста. Если бы скорость роста кристаллов не зависела от направления, была бы во всех направлениях одинаковой, то кристалл рос бы во все стороны одинаково и мог бы иметь только форму шара, как капля масла в воде. Именно потому, что растет он в разные стороны с разными скоростями, и вырастает он многогранником.

Мы рассказывали об опытах по росту шара, выточенного из кристалла и помещенного в раствор. В пересыщенном растворе шар приобретает плоские грани. Если бы скорость роста этого шара не зависела от направления, то он рос бы во все стороны одинаково; он только увеличивал бы свой объем, оставаясь по-прежнему шаром. Но в кристаллах скорость роста по разным направлениям различна. Поэтому кристаллический шар растет в разных направлениях не одинаково: в одних местах уже выросли плоские грани, в то время как в других точках рост еще не начался. Так кристаллический шар постепенно превращается в многогранник. Многогранные формы кристаллов потому и возникают, что скорость роста кристаллов зависит от направления.

Надо подчеркнуть, что свойства кристаллов зависят от направления, но отнюдь не от места. В каком бы месте вы ни ударили кристалл, он расколется по одинаковым симметричным плоскостям. Таких плоскостей в кристалле бесчисленное множество, и все они параллельны друг другу. Плоскость раскола может пройти через любое место кристалла, но направление ее будет всегда одно и то же.

Свойства кристалла одинаковы в разных местах и различны в разных направлениях. Что же является причиной анизотропии кристаллов? Почему свойства кристаллов меняются, когда меняется направление?

Посмотрите на модели структур кристалла. Во все стороны тянутся ряды частиц, но расстояния между частицами в разных направлениях различны; они одинаковы лишь в параллельных рядах. Прямая линия, проведенная в структуре в каком-нибудь направлении, пересечет некоторое определенное число частиц,

находящихся на одинаковых расстояниях друг от друга. Всякая линия, параллельная этой, встретит такое же число частиц на тех же расстояниях. Но линия, проведенная в другом направлении, пересечет уже другое количество частиц, с иными расстояниями между ними и иным расположением. Ясно, что эта неравномерность, неодинаковость кристаллической структуры в разных направлениях влияет и на различие свойств кристаллов в зависимости от направления.

Почему же физические свойства кристаллов, различные в разных направлениях, одинаковы в разных местах? Потому что частицы в кристаллах везде одинаковы. Все параллельные направления в кристалле равноценны, в каком бы месте структуры их ни проводить. Кристаллическую структуру надо представлять себе бесконечной, тянущейся во все стороны беспредельно.

Итак, кристаллы однородны: в разных местах свойства их одинаковы; кристаллы анизотропны: в разных направлениях свойства их различны.

*Однородность и анизотропия кристаллического вещества* — следствия его правильного внутреннего строения. А внешняя симметричная, многогранная форма образуется из-за анизотропии скоростей роста.

### **...И не только многогранники**

В природе кристаллы неправильной формы встречаются несравненно чаще, чем правильные многогранники. В руслах рек из-за трения кристаллов о песок и камни углы кристаллов стираются, многогранные кристаллы превращаются в округленные камешки — гальку; от действия воды, ветра, морозов кристаллы растрескиваются, рассыпаются; в горных породах кристаллические зерна мешают друг другу расти и приобретают неправильные формы; различные растворы и расплавы растворяют, разъедают кристаллы, в результате чего образуются окатанные, «обсосанные», «изъеденные» кристаллы. И все-таки свойства всех этих уродцев и свойства великолепных красавцев многогранников одинаковы.

Свойства кристалла зависят не от его формы, а от его структуры.

Внешний вид кристалла очень сильно зависит еще и от условий кристаллизации: от колебаний температуры, от примесей в растворе или расплаве, от скорости кристаллизации, от степени переохлаждения или пересыщения, от положения кристалла в процессе роста и еще от многих различных причин.

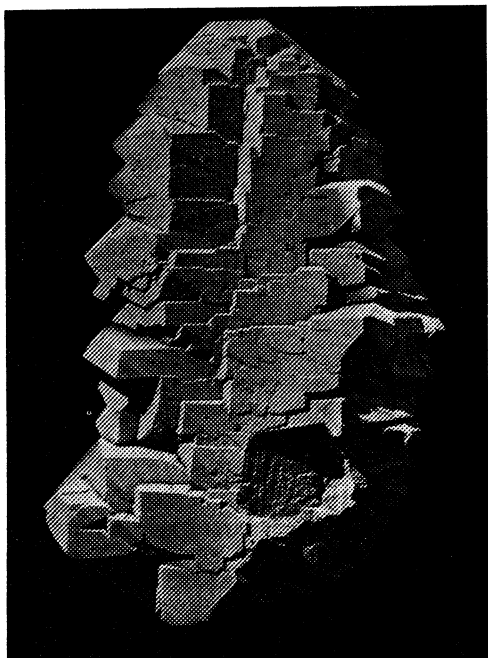


Рис. 76. Кристаллы кварца со ступенчатой структурой граней.

При быстрой кристаллизации, при росте в тонком слое или в густом, вязком растворе возникают иногда особые формы кристаллов: иглы, нити, перья, ветки, цветы, деревца, спирали. Примерами таких причудливых кристаллов служат всем известные ледяные узоры на окнах.

На стекле замерзшего окна легко увидеть, как возникают, растут и постепенно меняют свою форму кристаллы льда. Расчистите в непрозрачном слое



льда, затянувшего окно, круглый «глазок», подышав на замерзшее стекло или приложив к нему палец. Если перестать греть глазок, то он опять затянется слоем льда, так же, как замерзает прорубь на реке от холодного дыхания мороза. Понаблюдайте внимательно за тем, как закрывается глазок: сначала от его

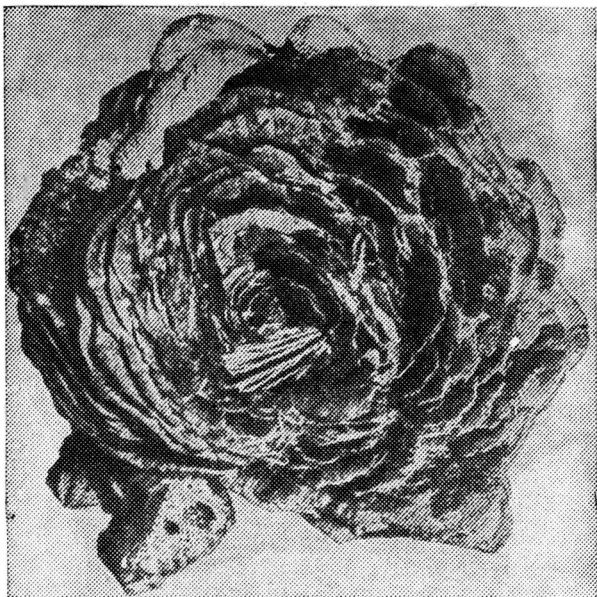


Рис. 77. Пластинчатые кристаллы гематита образуют «каменную розу».

краев к середине вытягиваются тонкие иголки — нежный, еле видимый узор. От этих иголочек в стороны ответвляются новые иголки, перышки, звездочки. Вот уже весь глазок покрыт ими, как тончайшим кружевом, а от краев глазка растет новый слой иголочек и звездочек, закрывая первое плетение, — отдельные веточки соединяются, сливаясь в сплошной слой. Так происходит рост кристаллов льда.

Новые кристаллы всегда начинают расти с краев глазка, от оставшихся нерастававших слоев льда. Это

и понятно: пристроиться к уже готовой кристаллической решетке частицам воды легче, чем начинать самим строить новую решетку.

На еще не замерзшем окне первые кристаллики появляются прежде всего в тех местах, где на стекле

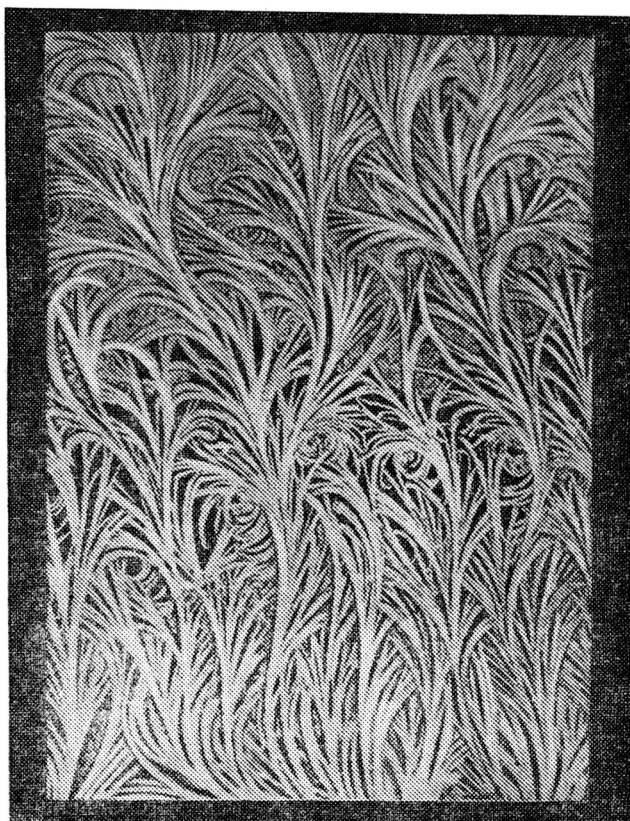


Рис. 78. Изогнутые кристаллы льда на оконном стекле.

есть царапины, грязь. Порой на совершенно не замерзшем стекле мороз нанижет гирлянду снежинок вдоль едва заметной царапины. Иногда стекло ка-

жется чисто вытертым, а мороз нарисует на нем узоры, проявляющие следы тряпки, которой протирали окно.

Первые кристаллики льда на стекле — это всегда шестилучевые звездочки или шестигранные стебельки. Но, увеличиваясь, разрастаясь, они встречаются друг с другом, дают друг на друга, сгибаются, искривляются. Как искусный художник, вырисовывает мороз на стекле звезды, перья, цветы и листья.

При росте кристаллов, особенно если рост идет очень быстро, часто образуются так называемые скелетные формы и ветвистые кристаллы, или дендриты (рис. 79). Самый характерный пример скелетных кристаллов — снежинки: это кристаллики, у которых интенсивно растут вершины, вырастают ребра, но обычно не вырастают плоские грани. Пример дендритных кристаллов — ледяные узоры на стекле. Дендриты (от греческого слова «дендрон» — дерево) очень часто образуются при кристаллизации металла.

Прославленный русский металлург Дмитрий Константинович Чернов описал в 70-х годах прошлого века дендритный кристалл стали, найденный внутри 100-тонного металлического слитка. В полости застывшего металла вырос ветвистый кристалл длиной более 40 сантиметров (рис. 80). Знаменитый «кристалл Чернова» — это самый большой из известных дендритов металлов; фотографии его можно найти чуть ли не во всех учебниках металловедения.

Самородные металлы — золото, серебро, медь и другие — в природе часто встречаются в форме дендритов.

Не только ветвистые кристаллы, но и пластины, нити или натечные формы в виде желваков и шаров, со скрытно кристаллическим строением особенно легко образуются при росте кристаллов из горячих источников.

Известный исследователь пещер Норбер Кастере в своих книгах «10 лет под землей» и «20 лет под землей» не раз с восторгом пишет об удивительных формах кристаллов, встречавшихся ему:

«...Мне вдруг показалось, что я стою по колено в кустах. Это действительно были кусты, но кусты из кристаллов, прелестнейших и нежнейших...

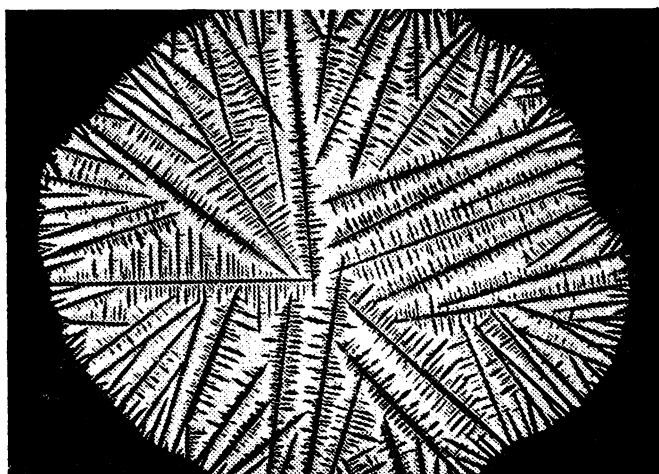
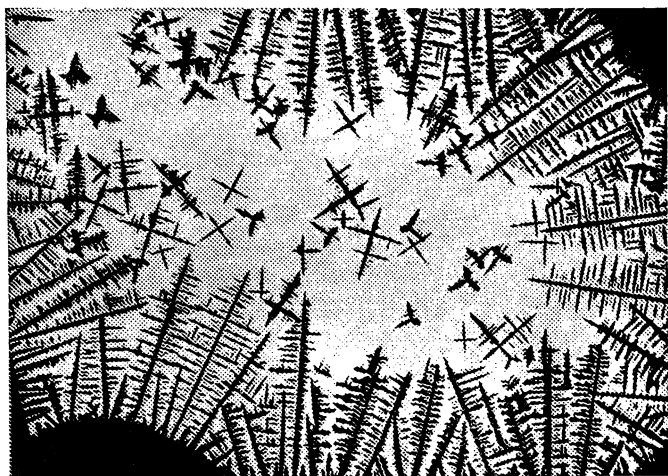


Рис. 79. Так растут дендритные кристаллы (две стадии кристаллизации азотнокислого аммония). Фото В. Ф. Парвова.

...Там были микроскопические сталактиты и безупречно прозрачные гигантские кристаллы. Там были образования блестящие и тусклые; гладкие и состоящие из колочек...

Наконец, там были две совершенно для меня новые, еще необъясненные формы: длиннейшие иглы, тонкие, как паутина, дрожавшие и разбивавшиеся от дыхания, и свисавшие с потолка и стен серебряные нити, блестящие, как шелковая пряжа. Эти необычайные минеральные нити можно обертывать вокруг пальца и даже завязывать в узел... Они представляют особую, редкую форму гипса.

...Интересным образованием, обзанным своим происхождением подземной воде, является оолит, или пещерный жемчуг... В неглубоком бассейне, питающемся падающей струей воды, движение воды держит зерна песка во взвешенном состоянии. Если вода содержит достаточно кальция и ее падение не слишком бурно, то песчинки непрерывно крутятся в водовороте и постепенно обволакиваются осадком известняка. Твердый осадок, как броней, покрывает ядро и постепенно становится толще. Такая «жемчужина», непрерывно вращаясь, приобретает совершенную сферическую форму и чрезвычайную твердость. Начав с песчинки, оолит может вырасти до размеров голубиного яйца.

И все эти удивительные формы камня — тоже кристаллы. Лупа, микроскоп, рентгеновские лучи обнаружат их кристаллическое строение и покажут, что форма кристалла зависит от его структуры и от условий роста, но структура кристалла не зависит от его внешней формы.

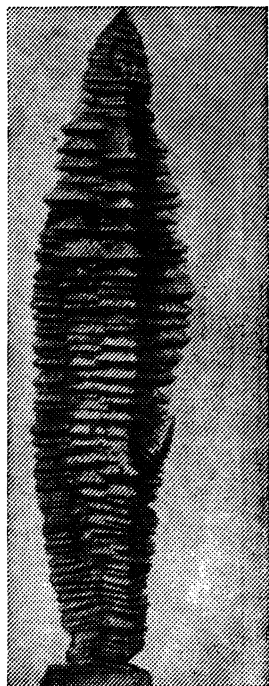


Рис. 83. «Кристалл Чернова»



Рис. 81. Кристаллы апатита из лунного грунта. Снято в электронном микроскопе. Увеличено в 1700 раз.

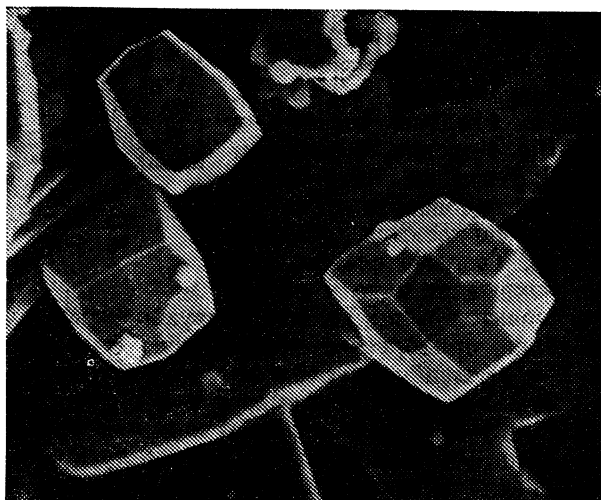


Рис. 82. Кристаллы железа из лунного грунта. Снято в электронном микроскопе. Увеличено в 8500 раз.

## Кристаллы во Вселенной

В облаках, в глубинах Земли, на вершинах гор, в песчаных пустынях, в озерах, морях и океанах, в доменных печах, в аппаратах химических заводов, в научных лабораториях, в клеточках растений, в живых и мертвых организмах — везде встретились мы с кристаллами. Нет такого места на Земле, где бы не было кристаллов, где бы не происходили все время возникновение, рост и разрушение кристаллов.

Но, может быть, кристаллизация вещества совершается только на нашей планете? Нет, мы знаем теперь, что и на других планетах, и на далеких звездах все время непрерывно возникают, растут и разрушаются кристаллы.

Метеориты, посланцы из звездного мира, тоже состоят из кристаллов.

В космических пришельцах — метеоритах — встречаются кристаллы, известные на Земле, и кристаллы минералов, на Земле не встречающихся. В громадном метеорите, упавшем в феврале 1947 г. в отрогах Сихоте-Алинского хребта на Дальнем Востоке, найдены кристаллы никелистого железа длиной в несколько сантиметров, между тем как в земных условиях природные кристаллы этого минерала столь малы, что их можно разглядеть лишь в микроскоп.

Советские и американские космические аппараты доставили на Землю образцы лунного грунта — в них тоже обнаружены кристаллические минералы и горные породы, сходные с земными.

Спутники, ракеты и космические аппараты передают на Землю сигналы и доставляют фотографии и образцы из космоса — и везде мы встречаемся с кристаллами.

Не только на Земле, но и в бесконечных просторах Вселенной возникают, растут и живут кристаллы.

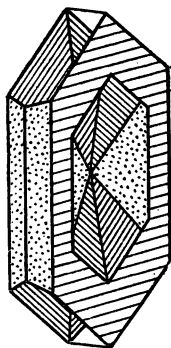


Рис. 83. Кристалл оливина из лунного грунта по Д. П. Григорьеву. Размер кристалла 0,7 мм.

## Глава 3

# КАК ВЫРАЩИВАЮТ КРИСТАЛЛЫ

Всякий кристалл, как и все существующее в природе, претерпевает со временем ряд изменений, составляющих то, что условно называют его «жизнью».

А. В. Шубников

## Зачем растят кристаллы

Зачем же создают еще и искусственные кристаллы, если и так почти все твердые тела вокруг нас имеют кристаллическое строение?

Прежде всего затем, что природные кристаллы не всегда достаточно крупны, часто они неоднородны, в них имеются нежелательные примеси. При искусственном выращивании можно получить кристаллы крупнее и чище, чем в природе.

Есть и такие кристаллы, которые в природе редки и ценятся дорого, а в технике очень нужны. Поэтому разработаны лабораторные и заводские методы выращивания кристаллов алмаза, кварца, корунда. В лабораториях выращивают большие кристаллы, необходимые для техники и науки, искусственные драгоценные камни, кристаллические материалы для точных приборов; там создают и те кристаллы, которые изучают кристаллографы, физики, химики, металловеды, минералоги, открывая в них новые замечательные явления и свойства. А самое главное — искусственно выращивая кристаллы, создают вещества, каких вообще нет в природе, множество новых веществ. По словам академика Николая Васильевича Белова, крупный кристалл — «это объект проявления, изучения и использования поразительных свойств кристалла, непрерывно революционизирующих науку и технику. Цены на идеальные природные кристаллы сильно возросли,



оправдывая большие затраты на их искусственное выращивание, которым занялось непрерывно увеличивающееся число специальных лабораторий, институтов и кафедр кристаллографии».

В лабораториях и на заводах все более совершенствуют методы создания искусственных кристаллов с нужными для техники свойствами, так сказать, кристаллов «по мерке», или «на заказ».

Напомним также, что гигантскими «фабриками искусственных кристаллов» являются все химические

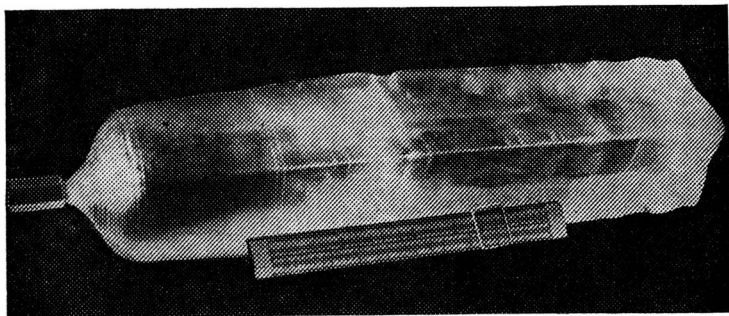


Рис. 84. Кристалл хлористого калия, выращенный из расплава.  
Фото А. В. Радкевича.

заводы, где вырабатывают различные соли, соду, химические удобрения и многие другие кристаллы, сахарные заводы, где варят кристаллический сахар, фармацевтические заводы, где синтезируют кристаллы лекарственных веществ, и прежде всего все металлургические заводы, где выплавляют металлы.

В этой главе будет рассказано о нескольких (отнюдь не обо всех) методах выращивания кристаллов и о некоторых характерных явлениях, связанных с ростом монокристаллов.

### **Кристаллизация из растворов**

Начнем с простейших опытов по росту кристаллов — таких, которые можно выполнить в любой студенческой или школьной лаборатории, или даже в домашних условиях.

Простейший опыт по росту кристаллов из растворов вы делаете, насыпая чересчур много сахара в стакан горячего чая: когда чай остывает, кристаллики сахара выделяются из пересыщенного раствора и оседают на дне стакана.

Прозрачные, великолепно ограненные кристаллики алюмокалиевых квасцов, фотографии которых в натуральную величину вы видите на рис. 85, выросли из

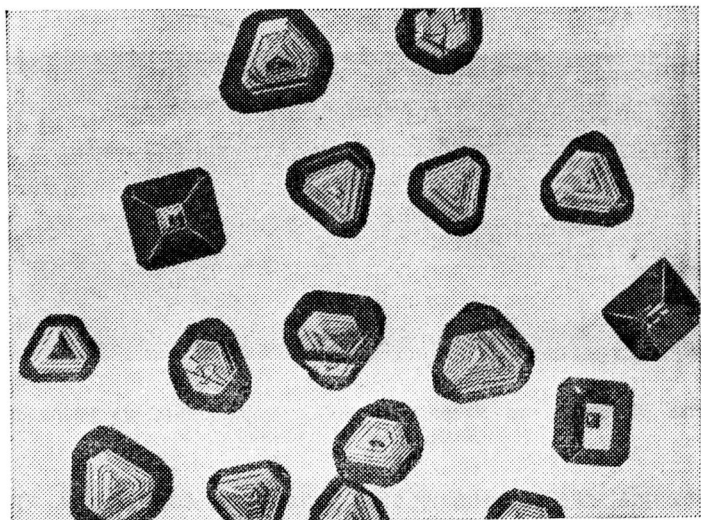


Рис. 85. Кристаллики алюмокалиевых квасцов, выращенные из раствора. Натуральная величина.

водного раствора за несколько часов. Как они растут, показано на рис. 86.

Чтобы приготовить водный раствор алюмокалиевых квасцов, надо растворить в горячей воде истолченные в порошок белые алюмокалиевые квасцы. Количество порошка, которое следует взять, определяется растворимостью данного вещества (о ней уже шла речь в гл. 2 на стр. 88).

Чтобы приготовить раствор алюмокалиевых квасцов, насыщенный при  $15^{\circ}\text{C}$ , надо на  $100\text{ см}^3$  воды

взять 12 г квасцов, а на два граненых стакана (400 см<sup>3</sup>) надо взять 48 г квасцов. Если же растворить в 400 г горячей воды 60 г квасцов, то получится раствор, пересыщенный при 15 °С на 12 г, по 3 г на каждые 100 см<sup>3</sup> раствора. Поэтому-то и надо брать горячую воду: в холодной не растворилось бы больше 48 г. Эти лишние 12 г должны выделиться из остывшего раствора. Но они не выделятся, если, пока раствор горячий (т. е. еще недосыщенный), профильтровать его и хорошо закрыть банку с ним, да если, к тому же, эту банку с раствором не трясти. При соблюдении всех этих предосторожностей раствор не закристаллизовывается, а остается пересыщенным. Так же

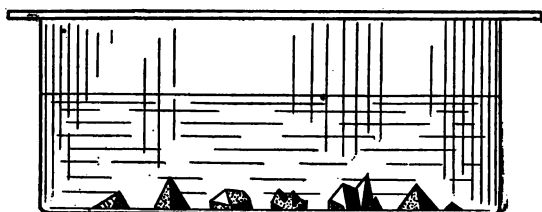


Рис. 86. В растворе растет много мелких кристалликов.

можно приготовить растворы других веществ, только количество растворяемого вещества надо брать иное, в зависимости от его растворимости.

Пересыщенный раствор начнет кристаллизоваться, если в него попадет какая-нибудь «затравка». Для этого достаточно приоткрыть крышку банки на одну-две секунды: в раствор попадут пылинки квасцов из воздуха. Откуда они взялись в воздухе? Если вы толкли или даже просто пересыпали порошок квасцов в этой же самой комнате, мельчайшие пылинки их наверняка разлетелись и не осели. Можно также внести в раствор иголкой несколько пылинок квасцов. Попав в пересыщенный раствор, пылинки квасцов немедленно начнут расти, а уж если в растворе началась кристаллизация, она не остановится, пока не выделится весь избыток растворенного вещества.

Так вырастают кристаллики квасцов. Так же можно вырастить один большой кристалл. Для этого в

неостывший раствор надо положить или подвесить на нитке небольшой кристаллик — затравку. Сначала он немного растворится, а затем примется расти.

Если в сосуд с раствором опустить какой-нибудь предмет, на котором находится много затравок, то он весь обрастает кристалликами. Опустите в раствор нитку, на которой есть кристаллические пылинки, — на них начнут осаждаться кристаллики, и в результате вырастает «нитка бус» из многогранных кристалликов. Такие нитки по красоте могут соперничать с искусственно ограненными бусами, но, к сожалению, кристаллы, выращенные из водных растворов, обычно очень быстро тускнеют и легко разрушаются. В этом трудность их применения в технике. А для новогодней елки кристаллические «бусы» очень хороши.

Можно сделать и елочные игрушки — звезды, фигурки из кристаллов. Для этого надо приготовить каркас из проволоки, обмотанной обычными нитками или ватой (или из провода в хлопчатобумажной изоляции), окунуть его в насыщенный раствор, тут же вынуть и просушить при комнатной температуре. Нитки пропитаются раствором и при высыхании на них образуются мельчайшие кристаллики, которые в дальнейшем послужат затравками. А дальше опускайте этот каркас в раствор и наращивайте на нем кристаллы. Если опустить в раствор разборную синтетическую елочку, предварительно обмотав ее ствол и ветви нитками, то можно вырастить «заснеженную» елку. Для этого лучше взять не квасцы, а дигидрофосфат калия,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (его называют KDP), или же дигидрофосфат аммония (ADP),  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , — замечательные кристаллы, которые растут для приборов, управляющих лучом лазера. Их растворимости на 100 г воды:

	при температуре	20 °C	40 °C
KDP		22,5 г	33 г
ADP		36,5 г	56,6 г

В одной из лабораторий Института кристаллографии АН СССР вырастили однажды таким способом кристаллическую рыбу в полметра длиной (рис. 37) в качестве подарка на юбилей основоположника советской промышленности роста кристаллов, академика

Алексея Васильевича Шубникова. Для изготовления этой рыбы потребовались, конечно, мастерство, изобретательность и знания. Авторы не только искусно смастерили каркас, но подобрали и цвет, и форму,

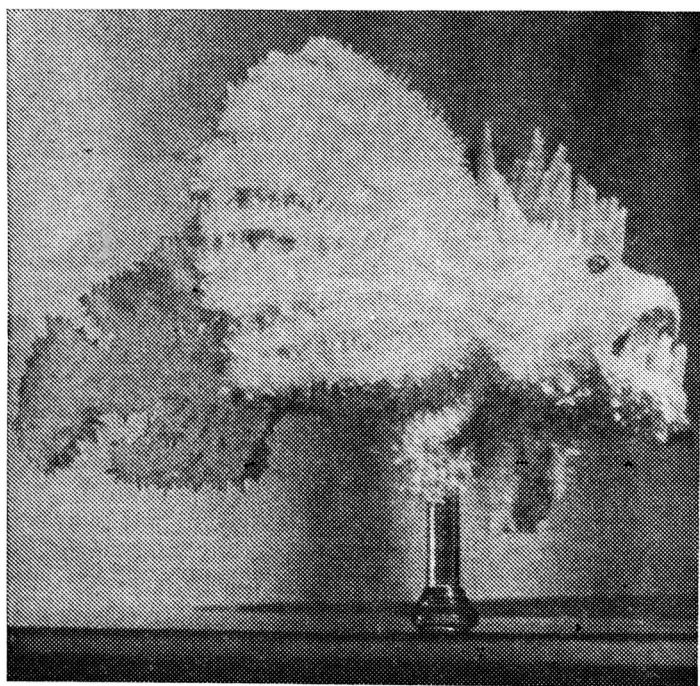


Рис. 87. Эту чудо-рыбу вырастили из кристаллов в подарок академику А. В. Шубникову. Уменьшено в 4 раза.

и размеры нараставших на нем кристалликов разных веществ.

Так же на затравке можно вырастить и один большой кристалл, но для этого надо много терпения, аккуратности и настойчивости.

Кристаллы из растворов можно растить и в сосудах, не закрытых крышкой. По мере испарения воды из открытого сосуда насыщенный раствор постепенно

становится пересыщенным, и в нем начинают расти кристаллы. Чтобы в раствор не попадала пыль, банку с раствором лучше прикрыть листком бумаги.

Большие кристаллы удобнее выращивать из испаряющегося раствора. Ведь вес кристалла, выросшего из пересыщенного раствора без испарения, равен весу излишка вещества в растворе. Например, если раствор пересыщен на 10 граммов и вода из него не испаряется, то из этого раствора не может вырасти

больше чем 10 граммов кристаллов. А из испаряющегося раствора постепенно выкристаллизуется не только излишек, но и все растворенное в нем вещество, если испарить всю воду.

Еще лучше поставить сосуды с испаряющимся раствором в эксикатор — плотно закрытую банку особой формы, на дне которой находится какое-либо вещество, которое жадно поглощает воду, испаряющуюся

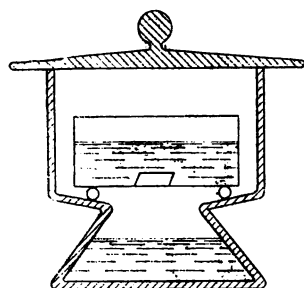


Рис. 88. Выращивание кристаллов из раствора в эксикаторе.

из раствора (серная кислота, хлористый кальций и другие) (рис. 88). В эксикаторе раствор испаряется гораздо скорее, а пыль в раствор не попадает, поэтому кристаллы растут здесь быстрее и без помех.

Насыщенный раствор можно приготовить и по-иному. В горячей дистиллированной (а если ее нет, то просто в кипяченой) воде растворяют много вещества — столько, сколько удастся растворить, подсыпая порошок понемногу и все время перемешивая раствор. Полученный раствор фильтруют в колбу или банку, которую закрывают куском ваты. Через некоторое время все лишнее вещество выпадает из раствора и оседает кристалликами на дно. Тогда насыщенный раствор без кристаллов осторожно сливают в тот сосуд, в котором должен расти большой кристалл.

Раствор можно сохранять насыщенным и при колебаниях температуры. Для этого надо оставить несколько кристалликов на дне плотно закрытого

сосуда с раствором. Если температура повысится, то растворимость возрастет, и кристаллики станут растворяться; при понижении температуры, наоборот, они будут расти. Таким образом, оставшиеся на дне кристаллики сами все время контролируют и поддерживают насыщение раствора.

Кристалл растет из пересыщенного раствора, точнее, только из тех участков пересыщенного раствора, которые находятся рядом с кристаллом. Вырастая, кристалл «высасывает» все лишнее вещество вблизи себя, поэтому он оказывается уже окруженным слоем раствора, не пересыщенного, а лишь насыщенного. Поэтому если надо вырастить большие, хорошо огранные, однородные кристаллы, то необходимо искусственно перемешивать раствор, тщательно регулировать температуру.

### **Фабрики кристаллов**

В домашних условиях, да и в обычной школьной лаборатории невозможно выращивать большие однородные кристаллы. Ведь в комнате температура никогда не остается постоянной, в течение дня она неизбежно колеблется, по крайней мере на 3—4 градуса, а то и больше. А при изменении температуры меняется растворимость вещества, и растворы оказываются то пересыщенными, то недосыщенными, кристаллы в них то растут, то растворяются. Поэтому большие однородные кристаллы необходимо растить в термостатах, т. е. установках, в которых автоматически поддерживается заданная температура (рис. 89). Для перемешивания раствора устанавливают специальную мешалку или двигают кристалл в растворе или же, оставляя кристалл неподвижным, вращают весь кристаллизатор с раствором.

В хороших термостатах рост кристаллов из растворов продолжается часы, дни, месяцы. В термостатах с постоянной температурой выращивают кристаллы из пересыщенного раствора. Однако для выращивания больших кристаллов здесь нужно иметь много пересыщенного раствора. При этом больших пересыщенных брать нельзя, потому что из сильно пересыщенных

растворов кристаллы растут слишком быстро и получаются не прозрачными, а мутными.

Лучше использовать не пересыщенные, а испаряющиеся насыщенные растворы. Для этого используют

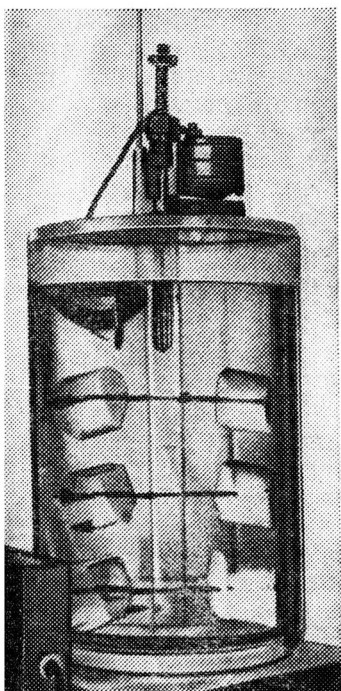


Рис. 89. Кристаллизатор для выращивания кристаллов из раствора.

термостаты, в которых температура меняется по заданному графику. Например, в начале кристаллизации она может быть на  $10-15^{\circ}$  выше температуры комнаты. В термостат ставится сосуд с насыщенным раствором, затем температура в термостате очень медленно снижается, скажем, каждые два дня на  $0,1^{\circ}$ ; при постепенном снижении температуры растворимость уменьшается, и раствор все время остается слегка пересыщенным, так что из него могут расти кристаллы. Так всего удобнее выращивать большие кристаллы. Если кристаллам ничто не мешает при росте из раствора, то формы их оказываются замечательно правильными. Трудно поверить, что их зеркально ровные грани не отполированы рукой искусного мастера.

Из растворов растят кристаллы всех тех веществ, которые хорошо растворяются в воде (или в других, легко доступных и удобных растворителях). Таковы квасцы, медный купорос, сахар (рис. 91) и, что особенно важно в промышленности, водорастворимые кристаллы, широко применяемые в радиотехнике и оптике: дигидрофосфат калия (KDP) (рис. 92),



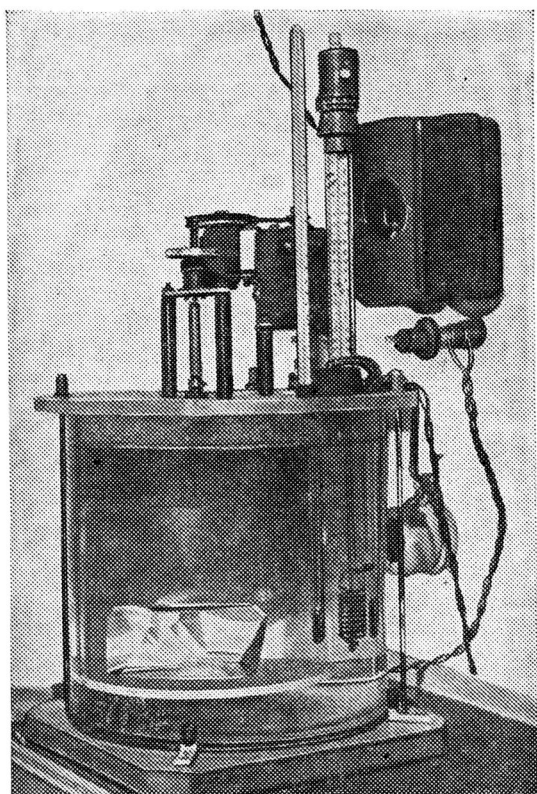


Рис. 90. Кристалл растет в растворе.

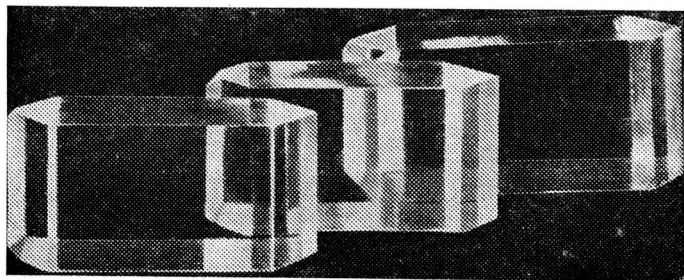


Рис. 91. Кристаллы сахара, выращенные из раствора.  
Фото Н. Н. Шефталя.

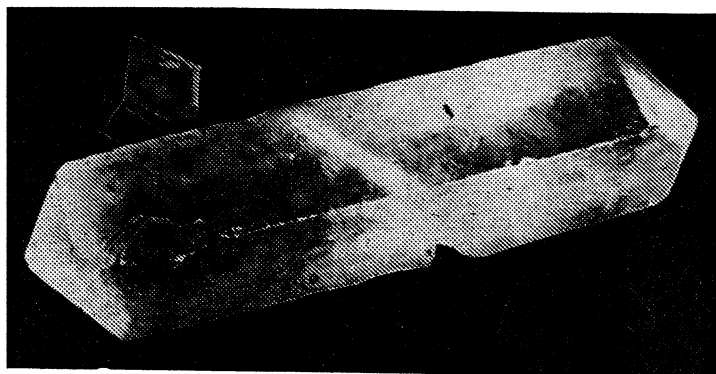


Рис. 92. Кристалл дигидрофосфата калия, выращенный из раствора. Фото М. Я. Вольфовича.

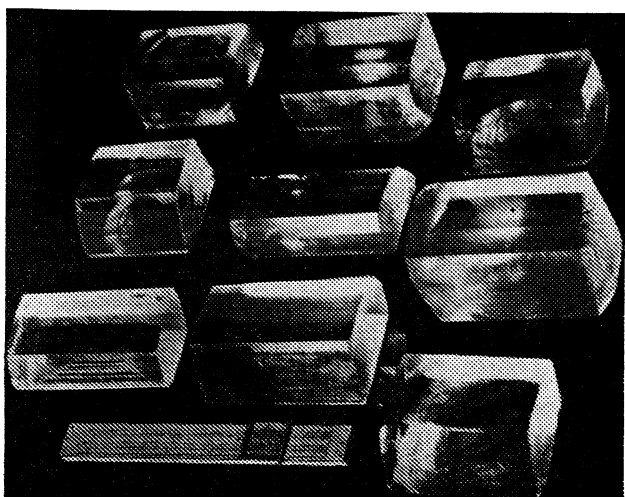


Рис. 93. Кристаллы сегнетовой соли, выращенные из раствора. Фото Н. Н. Шефталя.

дигидрофосфат аммония '(ADP)', сегнетова соль (рис. 93) и многие родственные им кристаллы — так называемые водорастворимые сегнетоэлектрические кристаллы.

Из кристаллов сегнетовой соли делают основные детали микрофонов, приемников, приборов для записи и передачи звука. Для этой же цели используют кристаллы KDP, ADP и многие другие, сходные с ними. Эти же кристаллы используют в оптике, особенно для управления излучением лазера.

Потребность в этих кристаллах очень велика. На специальных фабриках кристаллов выращивают ныне многие сотни таких кристаллов, каждый весом по несколько килограммов.

Первая в Советском Союзе «фабрика кристаллов» была создана в 1931 г. в Ленинградском физико-техническом институте под руководством Алексея Васильевича Шубникова. На этой фабрике выращивали кристаллы сегнетовой соли и других веществ.

Через несколько лет такая же фабрика кристаллов была основана в Москве, тоже под руководством А. В. Шубникова, в возглавленном им Институте кристаллографии Академии наук СССР. На этой фабрике метод кристаллизации из растворов разрабатывался и совершенствовался Н. Н. Шефталем. Кристаллы здесь росли из медленно охлаждавшихся растворов. В каждом из громадных термостатов одновременно росло более сотни кристаллов. Так удавалось выращивать идеально чистые кристаллы сахара и сегнетовой соли весом до 1,4 кг. Рост кристалла длился два-три месяца.

Малые фабрики кристаллов с медленным процессом роста, длившимся многие месяцы, не могли удовлетворить нужды промышленности, но особенно остро сказался недостаток кристаллов в самом начале Великой Отечественной войны. Для нужд армии и партизанских соединений потребовалось сразу наладить массовое производство надежных и портативных радиоприемников и радиопередатчиков, а для них не хватало кристаллов. В то время основными кристаллами для этой цели были кварц и сегнетова соль. Кварц тогда еще не умели выращивать искусственно,

и в те времена это казалось задачей неразрешимой, а запасы природного кварца, находимого геологами, никак не могли обеспечить нужды радиопромышленности.

Кристаллы сегнетовой соли тогда уже научились растить, но только лишь медленным, статическим методом, а требовалось много кристаллов и нужно было получить их быстро. И тогда, в первые военные месяцы, в Институте кристаллографии Академии наук СССР инженеры Борис Владимирович Витовский и Георгий Федорович Добржанский разработали скоростной, динамический метод выращивания кристаллов, отличающийся в основном тем, что кристалл в растворе движется и потому растет гораздо быстрее.

По идее Витовского и Добржанского сразу же был организован завод, где большие однородные, чистые кристаллы сегнетовой соли росли одновременно в нескольких сотнях кристаллизаторов, а заполнение банок раствором, перемешивание раствора, регулировка температуры — все это производилось автоматически, так что следил за ростом кристаллов всего один человек.

Такие же кристаллы сегнетовой соли, какие росли раньше по несколько месяцев, стали выращивать на этом заводе всего лишь за десять — пятнадцать суток.

Академик А. Е. Ферсман, посетив этот завод в 1942 году, оставил в книге посетителей такую восторженную запись:

«Когда увидишь, как удалось перехитрить природу и в неделю растить то, что растет сотнями лет в недрах Земли, тогда радуешься и ценишь мощь человеческой мысли, энергии и науки.

Эта победа над кристаллом и его силами — победа нашей советской науки и наших молодых научных сил. Эта победа родилась в борьбе за родину, в борьбе за применение новой техники против врага, в том горении, без которого не создается ничего крупного в жизни. Пусть же растет и развивается эта новая и замечательная область науки и техники, и пусть скорее в руках советской молодежи она сможет перейти к новым куль-

турным задачам нового мира, освобожденного от гнета фашизма».

В ту же грозную зиму 1941—1942 гг. в блокадном Ленинграде профессором Осипом Марковичем Аншелесом и его сотрудниками А. А. Штернбергом и В. Б. Татарским в Ленинградском университете был разработан другой скоростной метод выращивания кристаллов сегнетовой соли из раствора. В их кристаллизаторе кристалл в растворе движется «планетарным» способом: кристалл вращается, как Земля, вокруг своей оси, а ось ходит в кристаллизаторе по кругу, как Земля вокруг Солнца.

Так откликнулись кристаллографы на призыв Родины и так начала создаваться советская промышленность массового выращивания кристаллов.

Сейчас в опытное и заводское производство кристаллов внедрены многие методы выращивания из растворов. Основное преимущество выращивания из растворов — это возможность управления процессом роста путем регулирования температуры.

В заводских установках кристаллы растут из растворов со скоростями порядка сотых долей миллиметра в час. Чем медленнее растет кристалл, тем более совершенным и однородным он вырастает. Рост крупных кристаллов все же длится неделями и месяцами. Одна американская фирма для рекламы вырастила кристалл квасцов весом около 110 килограммов — но кристалл этот был далеко не совершенным.

Выращивание крупных кристаллов производят на затравках. В качестве затравки используется небольшой кристаллик того же вещества или пластинка, вырезанная из того же кристалла.

Чтобы поддержать пересыщение раствора, необходимое для роста кристалла, используют метод понижения температуры, метод испарения или метод циркуляции раствора.

Сущность метода циркуляции можно видеть на рис. 94. Перед нами три сообщающихся сосуда. В левом растет кристалл на затравке, а в среднем на дно насыпан порошок исходного материала. В левом и правом сосудах температура равна температуре кристаллизации, а в среднем сосуде она намного выше.

Мешалки, показанные на рисунке, перемешивают раствор и гонят его по трубкам, соединяющим три сосуда.

Если в левом сосуде раствор пересыщен или насыщен, то, попав в средний сосуд, он нагреется и окажется недосыщенным. Поэтому в нем будет растворяться материал, находящийся на дне. Таким образом раствор насыщается, а когда мешалка перегонит его в правый сосуд, где температура ниже, он становится пересыщенным. Теперь мешалка гонит его по

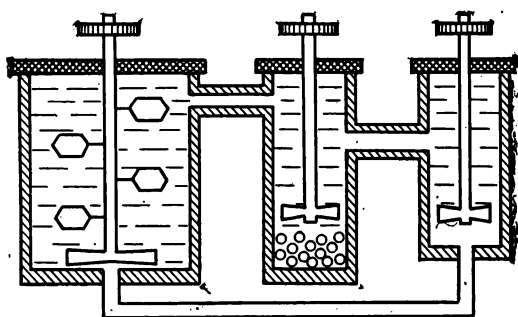


Рис. 94. Схема выращивания кристаллов из раствора методом циркуляции раствора.

нижней трубке в левый сосуд, где из этого пересыщенного раствора может расти кристалл. Обедненные части раствора, из которых растущий кристалл «высасал» пересыщение, поднимаются струйками от кристалла вверх и уносятся из левого сосуда в средний, где они опять растворяют вещество, находящееся на дне. Так растет кристалл в условиях непрерывной подпитки раствора, т. е. непрерывного дополнительного снабжения материалом.

Не напоминает ли это вам то, что происходит в природных, естественных «кристаллизаторах», таких как Кара-Богаз-Гол? Но здесь, в лаборатории или на заводе, человек, регулируя температуру установки, степень насыщения раствора, вращение кристалла, выбор затравки, полностью управляет процессом роста кристалла.

## Кристаллизация из расплавов

Многие вещества легче выращивать не из растворов, а из расплавов.

С кристаллизацией расплавов мы уже знакомились на опыте по росту переохлажденного гипосульфита в колбе. Кристаллизацию расплава гипосульфита можно наблюдать и под микроскопом. Так же как фотографический гипосульфит (тиосульфат натрия), для таких опытов пригоден тимол  $\text{CH}_3(\text{C}_3\text{H}_7)\text{C}_6\text{H}_3\text{OH}$ . Удобны эти вещества потому, что у них низкие температуры плавления: у гипосульфита  $48^\circ\text{C}$ , у тимола  $51,5^\circ\text{C}$ .

Несколько крупинок гипосульфита или тимола надо положить на предметное стекло и легким нагреванием стекла снизу (на спиртовке, на пламени спички, на плитке) расплавить вещество, а полученную каплю расплава закрыть сверху покровным стеклом, так, чтобы часть жидкости выступала из-под стекла. Если дать препарату медленно остыть почти до комнатной температуры, то расплав застывает с переохлаждением, без кристаллизации.

Теперь побеспокоим каплю расплава, «заразим» ее затравкой. Для этого достаточно там, где расплав выступает из-под стекла, слегка коснуться его кончиком иглы. Предварительно стоит уколоть этой иголкой кристаллик, чтобы на ней остались пылинки вещества; полезно слегка провести кончиком иглы по какому-нибудь шероховатому предмету, например по мелкозернистому точильному бруску\*). Стоит «заразить» переохлажденную каплю, коснувшись ее иглой, как сразу в ней начинается кристаллизация, и возникающие кристаллы быстро прорастают под покровное стекло, заполняя всю каплю. В микроскоп видно, как нарастают слои, как быстро расширяются плоские грани растущих кристаллов.

Очень красива под микроскопом кристаллизация расплавленного салола, всем известного лекарственного вещества. Его температура плавления  $42^\circ\text{C}$ . Если

---

\*) Подробное описание этого и других красивых опытов по росту кристаллов см. в книге: А. В. Шубников, В. Ф. Парвов, «Зарождение и рост кристаллов», М., 1969.

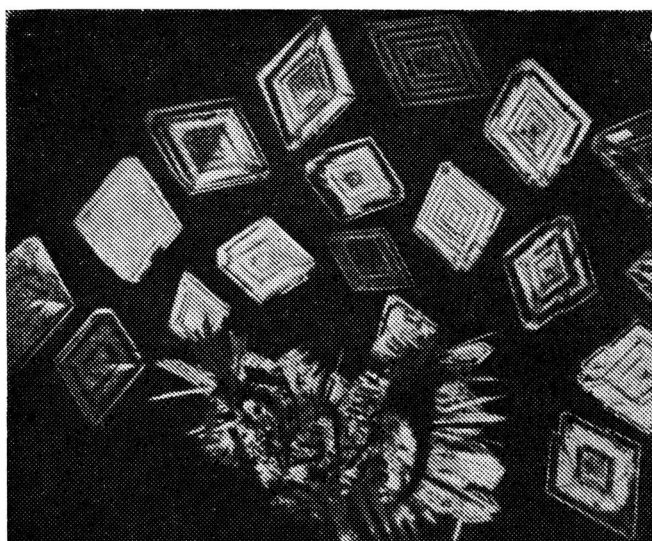


Рис. 95. Растущие кристаллы салоло под микроскопом. Увеличение в 60 раз. Фото А. В. Шубникова.

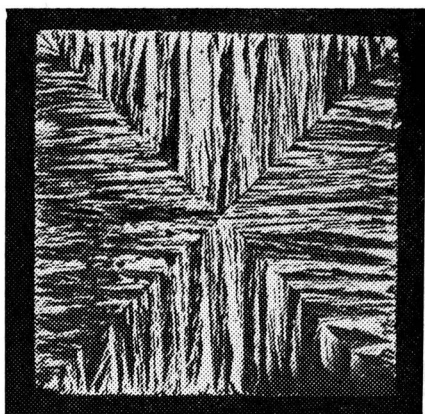


Рис. 96. Рост кристаллов салоло, начавшийся одновременно с четырех сторон квадрата. Фото Г. Г. Леммлейна.



поставить опыт так же, но, после того как препарат остынет до комнатной температуры, быстро обвести все четыре стороны покровного стекла «зараженной» иглой, то кристаллизация начинается почти одновременно от всех четырех сторон квадратного покровного стекла, и в микроскоп можно наблюдать, как кристаллики растут подобно иголкам или столбикам, от краев внутрь, а там, где столбики встречаются, рост прекращается (рис. 96). Так возникает «столбчатая» структура. Так же застывает лед в квадратных контейнерах (или в формочках в морозилке холодильника), так же кристаллизуется металл в изложницах, так же вырастают иногда и природные кристаллы (рис. 97).

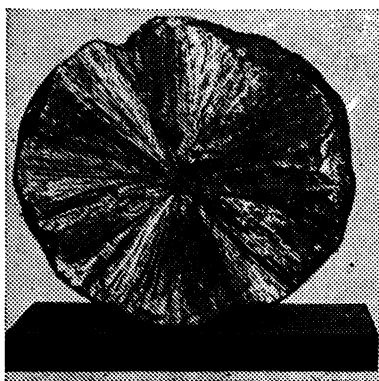


Рис. 97. Лучистое строение природного серного колчедана (марказита). Уменьшено в 2 раза.

Вообще, чтобы вырастить кристалл из расплава, надо, очевидно, нагреть вещество выше температуры плавления, а затем медленно охлаждать. Так выплавляется металл из руды в заводской печи. Все процессы выплавления или литья металла — это кристаллизация из расплава. Вырастает при этом металл поликристаллический.

Если надо вырастить из расплава монокристалл, приходится вести процесс кристаллизации так, чтобы расплав остывал не весь сразу, т. е. чтобы кристалли-

зация шла не по всему расплаву, а лишь в очень малом его участке. Кристалл обычно выращивают на затравке.

По сравнению с ростом из растворов выращивание из расплавов имеет то преимущество, что в расплаве кристалл растет быстрее, чем в растворе, скорость роста может достигать нескольких сантиметров в час.

Существует много способов выращивания больших монокристаллов из расплавов. На рис. 98 показана схема простого метода зонной плавки. Исходный материал помещен в ампулу (лодочку), которая может

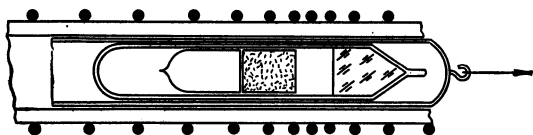


Рис. 98. Схема выращивания кристалла по методу зонной плавки; черными кружками показаны нагреватели.

двигаться, проходя по пути, как сквозь тоннель, через узкую печь. На том участке лодочки, который проходит через печь, — но только в этом узком перешейке — вещество в лодочке нагревается и плавится. Лодочка медленно проходит сквозь эту зону нагрева (в некоторых установках, наоборот, лодочка стоит, а вдоль нее медленно едет печь — но это все равно). В зоне нагрева вещество плавится, за ней — застывает, кристаллизуясь. Постепенно вырастает один кристалл, заполняющий лодочку. Обычно его заставляют кристаллизоваться на затравке, которую вводят в расплав.

В другом методе тигель с кристаллизующимся веществом медленно опускается в трубчатой печи, тоже проходя постепенно сквозь узкую зону нагрева. Выше зоны нагрева вещество еще не расплавлено. В зоне нагрева температура равна температуре плавления вещества. Вещество плавится, когда ампула проходит сквозь эту узкую зону нагрева. Опускаясь дальше, расплав попадает в более холодный участок печи и постепенно кристаллизуется.

Кристаллу здесь приходится вырастать не многогранным: он застывает, принимая форму сосуда, в котором рос. Стенки сосуда не дают кристаллу расти

свободно, стесняют его, поэтому кристалл обычно вырастает напряженным, неоднородным. В этом — основной недостаток выращивания из расплава в тиглях и ампулах.

Есть и такие методы, при которых кристалл растет свободно, не стесняемый стенками тигля. В установке (рис. 99) расплав находится в неподвижном тигле,

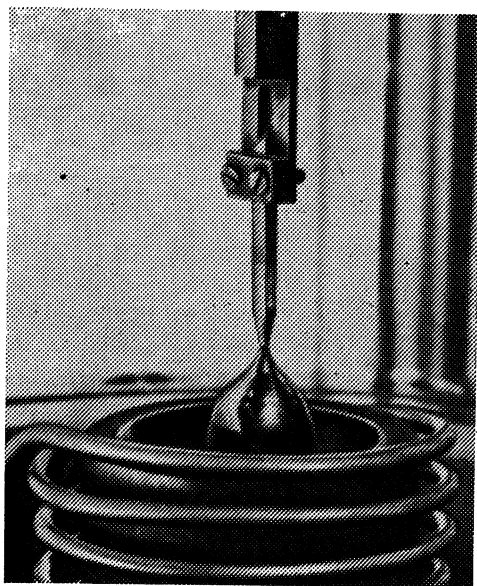


Рис. 99. Кристалл фосфида галлия растет из расплава.

а в него опущена затравка с растущим на ней кристаллом. Затравка укреплена на стержне, который непрерывно охлаждают. По мере того как кристалл вырастает, его все время поднимают, вытягивая стержень с затравкой из расплава, так что с расплавом соприкасается не весь кристалл, а только небольшой его слой, именно тот самый, который сейчас растет. Кристалл во время роста еще обычно вращают, чтобы тепло от него отводилось равномерно. Но и тут кристалл вырастает не многогранным — вращение, отвод

тепла и многие другие причины мешают ему расти свободно.

Методов выращивания из расплавов существует очень много; здесь выбраны лишь несколько примеров. Из расплавов растят кристаллы металлов, полупроводников, прозрачные кристаллы для оптики и многие другие. В расплавных кристаллизаторах вырастают совершенные, однородные кристаллы до 4—5 пудов весом (рис. 100).

В прошлой главе рассказывалось о том, как геологи, рискуя жизнью, проникали в горную пещеру, чтобы добыть кубики кристаллов флюорита с ребром в 10—15 сантиметров. А теперь в заводских печах выращивают кристаллы флюорита размером до полуметра, причем гораздо более однородные и чистые, чем в природе. В промышленных условиях растят кристаллы каменной соли (хлористого натрия), хлористого калия, фтористого лития и многих других соединений. Такие кристаллы применяются прежде всего в оптике, главным образом в оптике невидимого, т. е. инфракрасного и ультрафиолетового, излучения.

Известно, что наш глаз видит лишь очень узкую область спектра — видимый свет, но фотографические пластинки и оптические приборы воспринимают невидимые глазом более длинные (инфракрасные) и более короткие (ультрафиолетовые) волны.

Обычное стекло пропускает лишь самую ближнюю область инфракрасного излучения и непрозрачно для ультрафиолетового света (именно поэтому мы не загораем в комнате с закрытыми окнами). Есть, правда, немногие стекла со специальными добавками, пропускающие более длинные инфракрасные лучи, но и они не на много расширяют область прозрачности. Заглянуть в мир невидимого излучения удастся только с помощью кристаллов.

Из кристаллических материалов делают призмы, линзы, пластинки для оптических приборов, окна космических аппаратов, головки для наведения на цель и ориентации, детали приборов для управления лучом лазера.

Для оптики издавна использовались прозрачные для невидимых лучей природные кристаллы кварца, флюорита (плавикового шпата), кальцита (исландского

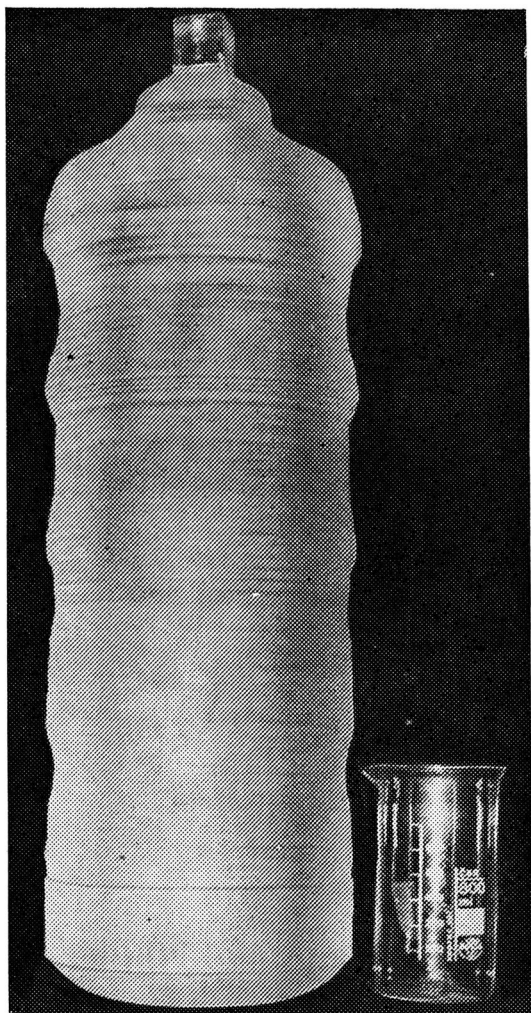


Рис. 100. Кристалл хлористого калия, выращенный из расплава.  
Фото В. И. Горилейского и Л. Г. Эйдельмана.

шпата), каменной соли, сильвина (хлористого калия). Но вполне прозрачные и однородные кристаллы в природе встречаются крайне редко. К тому же природные кристаллы недостаточно велики. Поэтому в

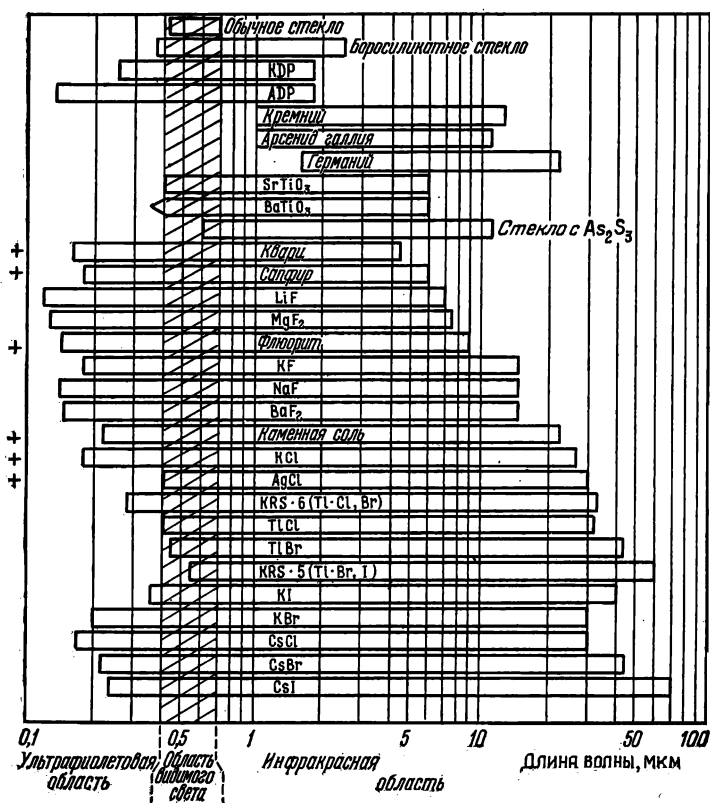


Рис. 101. Границы областей прозрачности различных кристаллов. Крестиками отмечены кристаллы, существующие в природе.

последние годы их полностью заменили кристаллами, которые выращивают искусственно. И — более того! — для оптики вырастили многие кристаллы, каких и не было в природе.

На рис. 101 приведена таблица, показывающая, в каких областях спектра прозрачны различные кри-

сталлы. Штриховкой выделена узкая область видимого света, справа от нее — инфракрасная область спектра, слева — ультрафиолетовая. Крестиком слева отмечены кристаллы, существующие в природе, но все они теперь выращиваются также и искусственно. Это кварц, флюорит, каменная соль, кальцит и немногие другие. Да, они есть в природе, но искусственно выращенные кристаллы несравнимо крупнее, однороднее, чище, прозрачнее.

Большинство же веществ, перечисленных в таблице, — это кристаллы, не существовавшие в природе, созданные человеком. Многие полупроводниковые кристаллы непрозрачны в видимой области спектра, но прекрасно пропускают инфракрасное излучение. Кристаллы германия и кремния на вид больше похожи на металл, блеск у них почти металлический, для глаза они непрозрачны. Однако они прозрачны для инфракрасных лучей, вплоть до больших длин волн.

Видоизменяя химический состав, кристаллическую структуру, условия выращивания, человек создает кристаллы не только прозрачные в заданном участке спектра, но еще и достаточно прочные, устойчивые по отношению к механическим воздействиям, к резкой смене температур, короче говоря — кристаллы с улучшенными свойствами, каких не было в природе.

Кристаллическая оптика дает возможность осуществить связь со спутниками, бросить взгляд в космические просторы. А большие кристаллы для оптических приборов выращивают в заводских печах.

Искусственно выращенные кристаллы применяют не только в оптике, но и в очень многих других областях техники.

Люди применяли металл в течение многих тысячелетий, и это всегда был металл *поликристаллический*. Лишь в самые последние годы начали выращивать и применять в технике металл *монокристаллический*. Оказалось, что монокристаллы металлов и сплавов отличаются от поликристаллов особыми, улучшенными свойствами. Монокристаллы прочнее, легче деформируются, менее хрупки, более стойки по отношению к химическим воздействиям, чем поликристаллы. Оно и понятно: у поликристаллов

ориентация разных зерен различна и особо слабыми местами являются границы между зернами. По ним легче всего идет разрушение. На границах зарождаются трещины и дальше разрушение идет чаще всего по границам, как по готовому руслу. Естественно, чтобы убрать эти слабые места, надо перейти от поликристалла к монокристаллу.

Техника выращивания монокристаллов металлов, в особенности тугоплавких, освоена совсем недавно, но теперь выращивают большие монокристалльные слитки, пластины, проволоки, трубы, ленты для различных изделий.

Детали газоразрядных и вакуумных приборов должны быть устойчивыми при работе в газоразрядной плазме или в высоком вакууме. В поликристаллическом тугоплавком металле, например, плазма цезия «пропотевает» через границы зерен. Лишь монокристаллы не выделяют газов при работе в вакууме, не изменяют ни форму, ни размеры в течение длительного времени при очень высоких температурах, под действием облучения или сложных переменных механических нагрузок. Применение монокристаллов молибдена и вольфрама позволило в десятки и сотни раз увеличить сроки службы электровакуумных приборов и создать новые приборы сверхвысокой чувствительности и надежности.

Особо чистые монокристаллы железа, молибдена, вольфрама, магния не такие хрупкие, как поликристалл, и могут быть удивительно пластичными, вплоть до того, что толстый металлический стержень можно завязать узлом.

Монокристаллы алюминия, цинка, висмута, свинца, железа и специальных сплавов применяются в атомной технике в качестве монохроматоров и поляризаторов нейтронов.

В последнее время быстро развивается изготовление и применение *монокристаллических турбинных лопаток* для газотурбинных двигателей. В авиационных газовых турбинах лопатки должны работать в потоке газа при очень высоких и резко меняющихся температурах, при резко переменных сильных напряжениях. В этих тяжелых условиях разрушение лопатки, изготовленной из поликристаллического ме-



талла, начинается и идет обычно по границам зерен. Естественно возникла заманчивая идея: чтобы улучшить прочность и стойкость турбинной лопатки, надо исключить границы зерен, т. е. делать лопатки из одного монокристалла, *выращивать* монокристалльную турбинную лопатку в кристаллизационной печи. Такие монокристалльные лопатки уже вырастили и их испытания в тяжелых рабочих условиях показали высокую эффективность нового метода: например, там, где поликристаллическая лопатка разрушалась через 16 часов работы, монокристалльная служила более ста часов в тех же условиях.

Уже сейчас применение монокристалльных лопаток из жаропрочных сплавов позволило резко увеличить надежность и длительность работы газовых турбин.

Кроме чисто практического значения в технике, колоссально значение монокристаллов металлов в чисто научных фундаментальных исследованиях. Только на монокристаллах можно исследовать электронную структуру металлов, их кристаллическое строение и экспериментально проверять теоретические предположки физики твердого тела.

### Способ А. В. Степанова

Не всегда выгодно растить большие кристаллы. Ведь из кристалла надо готовить изделие — и иногда очень малое, сложной формы. Для этого надо готовый кристалл распилить, выточить, отшлифовать, отполировать. При всех этих операциях существенная часть материала уходит в бесполезные отходы; подчас эта бесполезная часть достигает огромных цифр: до 95—98%! Выходит, растили-растили кристалл, а потом почти весь материал и почти весь труд выбрасывай! И есть еще одно, очень важное обстоятельство: при всякой обработке, как бы старательно ни вести ее, всегда качество кристалла портится, в нем образуются дефекты структуры.

Металлы и сплавы перерабатываются в изделия — листы, прутки, трубы, проволоку — прокаткой, пресованием, волочением, штамповкой крупных слитков. Всегда ли оправдано и необходимо строительство

гигантских прокатных станов, прессов, волочильных агрегатов?

Профессор, член-корреспондент Академии наук СССР Александр Васильевич Степанов (1908—1972) предложил способ выращивания кристаллов, по которому можно обойтись вообще без обработки, а непосредственно из жидкого металла выращивать,

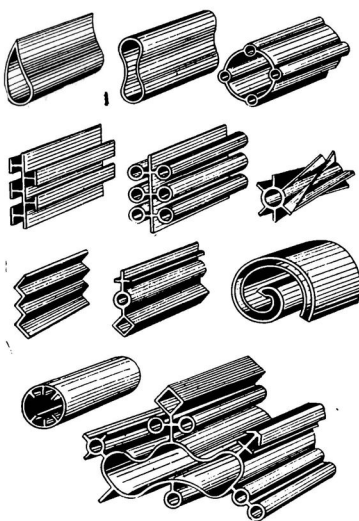


Рис. 102. Формы профилированных кристаллов, выращенных по способу А. В. Степанова.

кристаллизовать готовое изделие. По способу Степанова из расплава растят металлические трубы, прутки, ленты, проволоки, даже ребристые радиаторы, блоки труб для системы центрального отопления и многие другие изделия. И не только металлические.

Растят из расплава и пластины сапфира для окон оптических приборов, и цилиндрики, пластины, ленты, трубки, кольца полупроводникового германия. По способу Степанова растят изделия из алюминия, меди, их сплавов, чугуна, из каменной соли и других ионных кристал-

лов, из германия, кремния и других полупроводниковых материалов. Выращенное изделие не требует дальнейшей обработки. Поверхность его почти полированная.

Сущность метода Степанова, по его собственному описанию, заключается в следующем (рис. 105): «На горизонтальную поверхность расплавленного металла помещается пластинка из материала, малю взаимодействующего с расплавом. В пластинке имеется прорез — щель, вид и размеры которой находятся в соответствии с видом и размерами изделия. Пластинка называется поплавок или формообразователь. Через

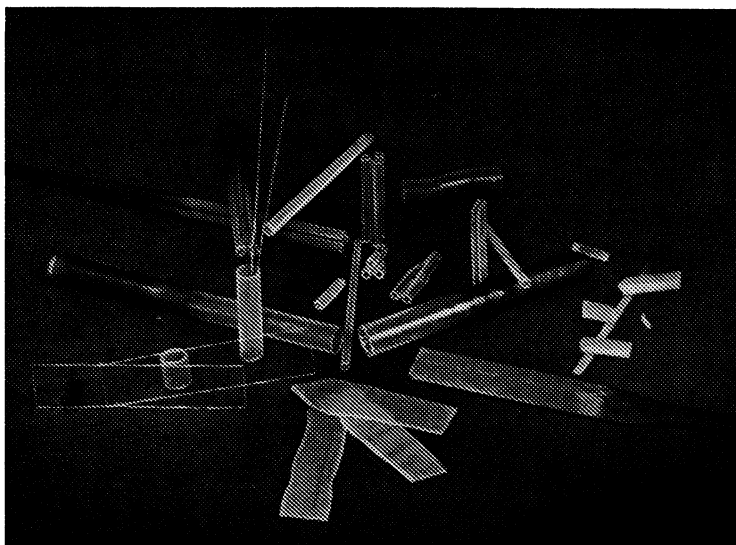


Рис. 103. Монокристалльные сапфировые нити, трубки, ленты и более сложные профили, выращенные по способу А. В. Степанова. Фото Е. Р. Добровинской.

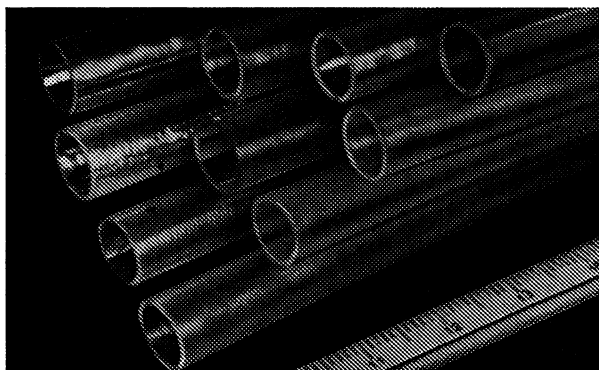


Рис. 104. Сапфировые трубки, выращенные по способу А. В. Степанова. Фото В. А. Татарченко.

щель формообразователя в расплав опускается затравка, форма которой соответствует профилю получаемого изделия. К затравке пристаёт расплав. При

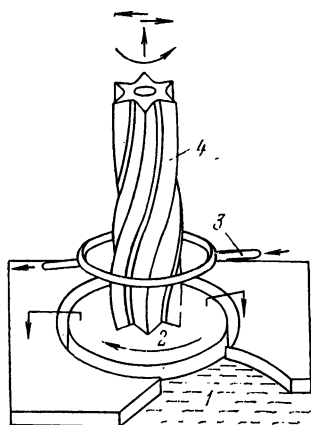


Рис. 105. Схема выращивания профилированных кристаллов по способу А. В. Степанова: 1 — расплав, 2 — формообразователь, 3 — холодильник, 4 — монокристалл, вытягиваемый из расплава.

движении затравки вверх пристающий расплав будет за ней тянуться. Попадая в область более низких температур, расплав будет застывать, превращаясь в изделие». Так выращивают профилированные изделия, монокристаллы и поликристаллические, причем скорость выращивания может быть невиданно большой — до десятка метров в час.

По способу Степанова выращивают метровые металлургические трубы, ленты кремния и германия, сапфировые нити диаметром в доли миллиметра, а длиной в десятки метров. Установки Степанова для выращивания непосредственно из расплава готовых кристалли-

ческих изделий сложного профиля успешно работают на многих предприятиях.

### Как вырастили рубин

Древняя индийская легенда повествует, что красный самоцветный камень рубин родился из капель крови доброго бога Асура: налетел на Асура в воздухе злобный демон Ланки, яростно терзал его, и падали капли крови в темные воды реки... Падали и застывали самоцветными рубинами... Потому-то, — рассказывает легенда, — так богаты рубинами берега рек Индии и Цейлона.

Рубин и сапфир относятся к самым дорогим и самым красивым из драгоценных камней. Издавна они воспеваются поэтами, издавна рассказывают о них легенды и сказания, издавна торгуют ими и воюют из-

за них. В «Сказках об Италии» рисует Алексей Максимович Горький образ жестокого завоевателя Тамерлана, стремившегося покорить и разрушить весь мир: «На его страшной седой голове — белая шапка с рубином на острой верхушке... Лицо хромого — как широкий нож, покрытый ржавчиной от крови, в которую он погружался тысячи раз. А в ушах царя — серьги из рубинов Цейлона, из камней цвета губ красивой девушки».

Алый рубин и лазорево-синий сапфир в древности и в средние века считали целебными камнями: «Рубин врачует сердце, мозг, силу и память человека, сапфир хранит и умножает мужество, очищает глаза, укрепляет мускулы».

Ушли в прошлое короны с огромными рубинами, бриллиантами, сапфирами... Но любовь к камню отнюдь не ушла в прошлое. И сейчас, как и в древности, люди любят украшения из самоцветных камней. Кольцо с рубином, рубиновые брошки или серьги — совсем не редкость, их можно купить в любом ювелирном магазине. В чем же дело? Подешевели, что ли, драгоценные камни Индии и Цейлона? Больше нашли их в россыпях восточных рек?

Нет, дело не в этом. Природные драгоценные камни находят в земле по-прежнему чрезвычайно редко. Но люди научились растить самоцветные кристаллы рубинов и сапфиров. Искусственные кристаллы драгоценных камней понадобились не только для украшений. Отнюдь нет. У всех этих камней, кроме красоты, есть и другие качества, более скромные, но более полезные. Кроваво-красный рубин и лазорево-синий сапфир — что общего между ними? Цвет разный, по виду ничего общего. Минералог скажет: рубин и сапфир — это родные братья, это вообще один и тот же минерал — корунд, окись алюминия  $Al_2O_3$ . Разница в цвете возникает из-за очень малых примесей в окиси алюминия: ничтожная добавка хрома превращает бесцветный корунд в кроваво-красный рубин, окись титана — в сапфир. Есть корунды и других цветов. Есть у них и еще совсем скромный, невзрачный брат: бурый, непрозрачный, мелкий корунд — наждак, которым чистят металл, из которого делают наждачную шкурку. Корунд со всеми его разновидностями —

рубином, сапфиром, наждаком — это один из самых твердых камней на Земле, самый твердый после алмаза. Корундом можно сверлить, шлифовать, полировать, точить камень и металл. Из корунда и наждака делают точильные круги и бруски, шлифовальные порошки. Из твердого полированного корунда — чаще всего из красного рубина — делают опорные камни для часов, хронометров, аналитических весов, неизнашивающиеся иглы для проигрывателей. Советские часы недаром славятся во всем мире, считаются лучшими, самыми точными. Точность хода часов обеспечена рубиновыми камнями. Если вы откроете крышку часов, вы увидите в их механизме как бы крохотные красные пятнышки: это и есть опорные рубиновые камни. Вся часовая промышленность работает на искусственных рубинах. На полупроводниковых заводах тончайшие схемы рисуют рубиновыми иглами. В текстильной и химической промышленности рубиновые нитеводители вытягивают нити из искусственных волокон, из капрона, нейлона. Такие нитеводители служат по несколько лет, не рвут, не портят нить.

Рубин теперь не только предмет роскоши: он стал тружеником. И насколько богаче, нужнее, полезнее для людей эта вторая жизнь самоцветного камня!

Еще интереснее и увлекательнее совсем новая жизнь рубина и сапфира, начавшаяся всего несколько лет назад, когда рубин стал основным материалом для лазеров и с лазерным лучом вышел на просторы Вселенной.

Новая жизнь рубина — это *лазер* или, как называют его в науке, *оптический квантовый генератор* (ОКГ), чудесный прибор наших дней. Он родился совсем недавно, всего лишь пару десятилетий назад. Красный цилиндрик искусственного рубина, хорошо отполированный — вот и все. Оказалось, что кристалл рубина усиливает свет. Это уже не любой корунд, а именно рубин, т. е. корунд с небольшой примесью хрома, очень прозрачный, без каких-либо изъянов, выращенный в самых совершенных условиях. Если на кристалл рубина пустить слабый пучок света от небольшой маломощной лампы, то свет не только не поглотится в кристалле, а, наоборот, брызнет из кристалла как алая молния, как необычайно мощный,

узкий, яркий пучок света. Кристалл не поглощает, а усиливает свет. Он отдает гораздо больше, чем получает, но здесь не нарушается закон сохранения энергии, энергия не рождается из ничего: в кристалле происходят сложные процессы электронных переходов в примесных атомах. Образно можно сказать, что кристалл отдает световому пучку часть своей энергии, благодаря чему испускается пучок света небывалой мощности. Сравните с электрической лампочкой: на столе у вас, наверное, светит лампочка мощностью 40—60 ватт, а стоваттная лампочка уже слепит глаза. А импульсная мощность рубиновых лазеров сейчас уже доведена до миллиардов ватт! Миллиард ватт — как это себе представить?! Сравните: мощность излучения Солнца составляет 7 киловатт с одного квадратного сантиметра. Как бы ни пытались сконцентрировать солнечный свет — большей мощности излучения мы не добьемся. Лазер светит ярче тысячи солнц.

Мощный луч лазера доходит до Луны и до других планет, следит за космическими кораблями и спутниками, доносит до экрана телевизора шаги человека на Луне и братское рукопожатие космонавтов «Союз» — «Аполлон». Когда впервые применили луч лазера, чтобы следить за искусственным спутником Земли, один французский ученый сказал, что этот опыт можно сравнить с метким выстрелом в глаз мухи с расстояния в пять километров, да еще, если эта муха летит со скоростью, ни много, ни мало, сто километров в час. В самом деле: спутник был крошечный, всего 60 см диаметром, летел он на высоте более полутора тысяч километров со скоростью в двести тысяч километров в час.

Это было всего лишь десятилетие назад. А ныне мы уже не удивляемся, читая в газетах о том, как посылали луч лазера на Луну, ловили его отражение, следили за космическими кораблями и говорили с людьми на Луне по лучу лазера.

Луч лазера обладает громадной мощностью. Он легко прожигает листовой металл, сваривает металлические провода, прошивает металлические трубы, сверлит тончайшие отверстия в твердых сплавах, алмазе. Совсем недавно все это было в диковинку, а

сейчас наша промышленность уже выпускает серийные лазерные станки для обработки металла.

Это всего лишь отдельные применения мощного лазерного луча. Лазеру по существу еще нет и трех десятков лет. Первый успешно действовавший лазер на основе кристалла рубина был создан в 1960 г. В технике происходит ныне подлинная революция, рожденная лазером. В первое время в технике работали только рубиновые лазеры — приборы, в которых основной частью служит красный стерженек из искусственного кристалла рубина.

Появились и новые лазерные кристаллы. Рубин теперь совсем не полновластный хозяин в царстве лазеров. Флюорит, гранаты, арсенид галлия и многие другие кристаллы тоже успешно применяются для лазеров \*).

И — кто знает?! — может быть где-то в глубинах Вселенной есть другие, вездесущие цивилизации, разумные существа там тоже растят кристаллы для лазеров и пришлют нам сигналы по лазерному лучу, а мы ответим им тоже лазерными сигналами. Жители Земли не только мечтают об этом, но уже начинают поиски...

Но откуда же берется столько драгоценного камня? Конечно, это уже не природные кристаллы, изредка встречающиеся в россыпях. Это синтетические кристаллы, выращенные человеком.

Впервые вырастил кристаллы рубина французский ученый Вернейль в самом начале нашего века. Выращивание кристаллов рубина по Вернейлю стало первым промышленным методом синтеза кристаллов.

Маленькие рубины вставлялись как опорные камни в часы еще в XVIII в. Но рубин был очень дорог, а поэтому чрезвычайно дорогими были и точные часы. Лишь после того, как научились растить искусственные кристаллы рубина и делать из них опорные камни, с начала нашего столетия вся часовая промышленность перешла на искусственные рубины, и часы перестали быть предметом роскоши.

В дореволюционной России не было своей рубиновой промышленности, точные часы покупались за гра-

---

\*) Существуют также лазеры газовые и жидкостные.



ницей. В 1928 г. в Москве, в тресте «Русские самоцветы», была организована опытная мастерская по выращиванию кристаллов корунда для ювелирной и часовой промышленности, которая дальше стала быстро расширяться. За несколько дней до Великой Отечественной войны в московских газетах появилось сообщение о том, что в Институте кристаллографии

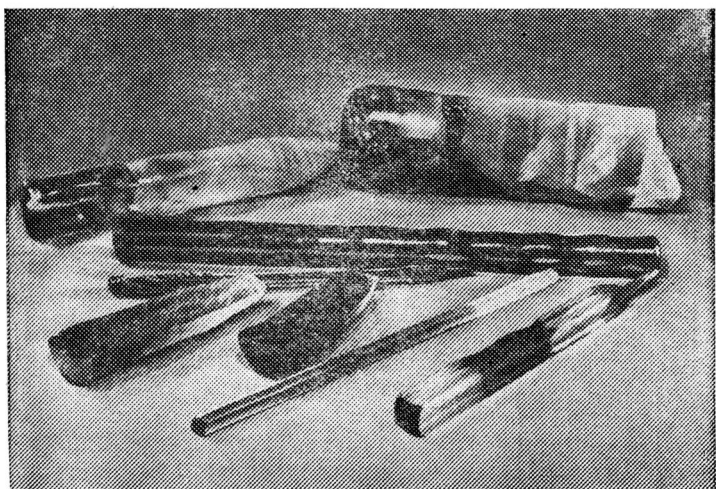


Рис. 106. Искусственно выращенные кристаллы рубина и сапфира. Уменьшено в 4 раза. Фото М. Я. Вольфовича.

Академии наук изобретателем С. К. Поповым под руководством академика А. В. Шубникова выращены большие кристаллы рубина. А дальше производство рубина расширилось так, что теперь уже работают многие заводы, на которых растят кристаллы рубина и сапфира. В 1950 г. А. В. Шубникову и С. К. Попову за разработку и усовершенствование способа выращивания кристаллов рубина была присуждена Государственная премия.

Выращивать кристаллы корунда трудно потому, что у него необычайно высока температура плавления:  $2030^{\circ}\text{C}$ . Где найти тигли, которые не разрушались бы от такого жара?

Достоинство метода Вернейля заключается в том, что кристалл растет хотя и из расплава, но без всякого тигля, ибо кристаллы рубина растут как сталагмиты в пещере: мелкий-мелкий, как пудра, порошок окиси алюминия сыплется непрерывной тонкой струйкой и попадает в пламя гремучего газа, где температура больше двух тысяч градусов, так что порошок тут же расплавляется. Мельчайшие капельки расплава падают вниз, на подставку, на которой уже закреплён кристаллик затравка, и, застывая, кристаллизуются (рис. 107). Так и нарастает кристалл, почти как в старой индийской легенде: падают кроваво-красные капли и застывают самоцветным камнем.

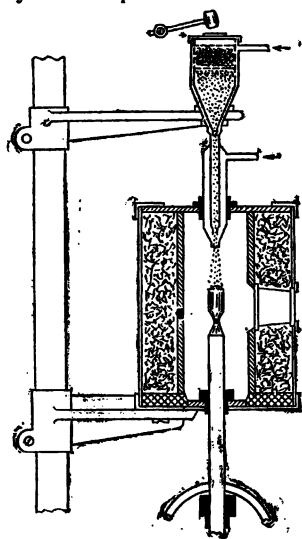


Рис. 107. Схема выращивания кристаллов рубина.

Ну, правда, не обязательно кроваво-красным: это уже зависит от того, какую примесь добавить в расплав, что хотите вырастить — красный рубин, синий сапфир или бесцветный лейкосапфир. Искусственный камень не только не хуже природного: тот же цвет, та же игра красок, та же твердость, тот же

блеск. Но он и лучше природного. Природные кристаллы самоцветов малы. Природный рубин весом в два-три грамма — это уже величайшая редкость и драгоценность. Человек же оказался куда более умелым, чем природа: в лабораториях и на заводах растят рубины и сапфиры длиной до метра, весом в килограммы. Никаким султанам древности не снились такие самоцветы. Побывал бы этот султан или волшебник из старой сказки на современном заводе, где в десятках печей растут не караты или граммы — нет, килограммы, тонны драгоценных камней!

В последние годы разработаны новые методы выращивания корунда. Однородные, высоко совершен-

ные кристаллы рубина и сапфира выращивают из расплава несколькими различными методами. В Институте кристаллографии имени А. В. Шубникова Х. С. Багдасаровым недавно создан новый метод направленной кристаллизации, которым выращивают крупногабаритные кристаллы сапфира. Заметим, что в природных минералах сапфиром называют синие кристаллы корунда, а бесцветные, прозрачные носят

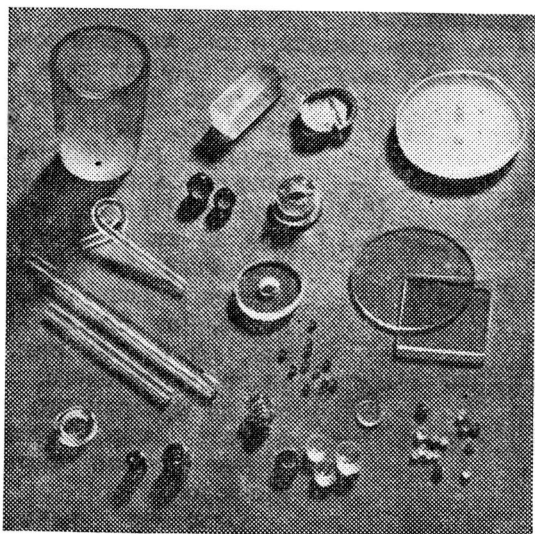


Рис. 108. Изделия из кристаллов рубина и сапфира.

название лейкосапфира. В технике же название сапфира укоренилось за бесцветными кристаллами.

С тех пор как научились выращивать большие толстые пластины сапфира, эти кристаллы обрели еще одно новое призвание. Сапфир прозрачен для дальней инфракрасной области спектра, поэтому из него делают пластины для оптических приборов.

Даже и это еще не все. Основная масса кристаллов сапфира идет в полупроводниковую промышленность: из-за высокой твердости, способности к полировке и совершенства структуры сапфировые

пластинки служат подложками, на которых растут полупроводниковые пленки.

Для разных областей техники на заводах растут многие тысячи кристаллов рубина и сапфира.

### Как выращивают кварц

В обычных условиях из растворов хорошо растут кристаллы тех веществ, у которых достаточно велика растворимость. А как быть с веществами, которые не хотят растворяться?

Выше мы рассказывали о том, как еще совсем недавно, в 30—40-х годах, остро ощущалась в технике нехватка кристаллов кварца (стр. 159). У горного хрусталя (кварца) есть ряд замечательных физических свойств. Прежде всего горный хрусталь прозрачен — прозрачен не только для видимого света (для него и обычное стекло прозрачно), но и для невидимого ультрафиолетового. Поэтому из прозрачного кварца делают линзы, призмы и другие детали оптических приборов.

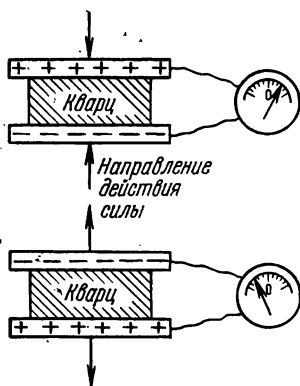


Рис. 109. Схема пьезоэлектрического эффекта.

Особенно удивительны электрические свойства кварца. Если сжимать или растягивать кристалл кварца, на его гранях возникают электрические заряды. Это — *пьезоэлектрический эффект* в кристаллах. Название происходит от греческого слова «пьезо» — давить, буквально: электричество, возникшее от давления (рис. 109).

Существует и *обратный пьезоэлектрический эффект*: если приложить к пьезоэлектрическому кристаллу электрическое поле, кристалл сжимается или растягивается (в зависимости от направления поля).

С помощью прямого или обратного пьезоэлектрического эффекта кристалл непосредственно преобразует механическую энергию в электрическую или,

наоборот, электрическую энергию в механическую. Чем больше усилие, действующее на кристалл, тем больше и величина возникающих зарядов. Знак заряда меняется, если меняется направление силы. Если попеременно сжимать или растягивать кристалл, будут меняться и знаки зарядов. Механические колебания преобразуются в электромагнитные. Обратно — если действовать на пластинку переменными электрическими зарядами, она будет периодически сжиматься или расширяться, т. е. начнет колебаться.

Пьезоэлектрический эффект в кварце и в других веществах открыли еще в XIX в., но применять его научились не сразу, а лишь после того, как возникла практическая потребность. Было это во время первой мировой войны, когда ученые стран Антанты напряженно искали средства для борьбы с немецкими подводными лодками. Лодку надо было обнаружить, нащупать и измерить расстояние до нее. Для этих целей удобно использовать ультразвуковые волны. Эти волны такие же, как звуковые, но ухо человека их не слышит, частота колебаний у них больше, а длина волны меньше, чем у обычного звука. Ультразвук удобен тем, что он мало поглощается и рассеивается в воде. Для подводной сигнализации потребовались генераторы — источники и приемники ультразвука. А их тогда еще не было.

И вот тут французский физик Поль Ланжевен (1872—1946) вспомнил о пьезоэлектричестве: если подвести к пьезоэлектрическому кристаллу электромагнитные колебания, кристалл преобразует их в колебания механические, а последние передаются окружающей среде — рождаются ультразвуковые волны.

Всем известно явление эхо: крикнешь в лесу: «Ау!» и эхо отзовется: «Ау!». Это звуковые волны дошли до какого-то препятствия и отразились от него. Для ультразвуковых волн тоже существует эхо, и Ланжевен решил применить его, чтобы находить препятствия и измерять расстояния до них. В сконструированном Ланжевенем в 1916 г. эхолоте — первом приборе для измерения глубины моря по отражению ультразвуковых волн — были две пластинки: одна излучала ультразвуковые волны, а другая такая же пластинка принимала эти волны и преобразовывала их в электро-

магнитные. Пластинки эти сделали из большого кристалла природного горного хрусталя (кварца), привезенного из Бразилии. Такие пластинки называют теперь пьезокварцевыми, или просто пьезокварцами.

С работ Ланжевена началось широкое использование пьезоэлектрических кристаллов в технике. Если не говорить о ювелирной промышленности и о применении твердых кристаллов в часовой промышленности, это было первое промышленное использование физических свойств монокристаллов. В наши дни в качестве пьезоэлектриков используют не только кварц, но и многие другие, в основном искусственно синтезированные вещества: сегнетову соль, титанат бария, дигидрофосфаты калия и аммония (KDP и ADP) и многие другие.

В переменном электрическом поле пьезоэлектрические пластинки колеблются с частотами от тысячи до миллионов колебаний в секунду. При этом частота колебаний пластинки строго постоянна и колебания практически не затухают. Именно такие устойчивые, стабильные колебания требуются в радиотехнике для стабилизации (поддержания частоты) приемных и передающих радиостанций. Таким образом, пьезоэлектрические пластинки обеспечивают постоянство частот на радиостанциях.

Стабилизация частот радиоволн — это самое важное, но далеко не единственное применение пьезоэлектрических свойств кристаллов. Пьезоэлектрические пластинки откликаются на изменения давления от самых незначительных до громадных. Приборы с пьезокристаллами позволяют изучать изменения давления в мощных паровых машинах и двигателях внутреннего сгорания, а также усилия, возникающие при работе станков. Существуют и пьезоэлектрические методы измерения давления крови в кровеносных сосудах человека и давления соков в стеблях и стволах растений.

Пьезокристаллы регистрируют изменения давления не только исключительно точно, но и поразительно быстро. Поэтому их с успехом применяют для изучения давлений, меняющихся столь быстро, что никакой другой измерительный прибор не успевает уловить эти изменения. Пьезопластинками измеряют,

например, давление в стволе артиллерийского орудия при выстреле, давление в момент взрыва бомбы, мгновенные давления в цилиндрах двигателей при взрыве в них горячих газов.

Пьезопластинки, соединенные с усиливающими и регистрирующими электрическими приборами, также удивительно чутко регистрируют звук, каким бы слабым он ни был. Они обнаруживают шумы в сердце человека. Они же позволяют «выслушивать» и автомобильный мотор, как врач выслушивает человека. В неправильно рассчитанных деталях самолета пьезопластинки выявляют опасные шумы, которые могут привести к аварии. Можно еще рассказать, что на Гавайских островах пьезокварцевые пластинки «сторожат» посевы сахарного тростника от уничтожающего их вредителя — голубого жука. Пьезокварцевые приборы, расставленные на плантациях, улавливают еле слышное характерное жужжание, которое издают эти жуки, и сигнализируют об их приближении.

Пьезоэлектрические кристаллы широко применяют для воспроизведения, записи и передачи звука. Пьезоэлектрическая пластинка, помещенная в микрофон, преобразует звуковые колебания в электрические. Звуковая волна, дойдя до пьезопластинки, заставляет ее колебаться. На электродах, соединенных с пластинкой, появляются электрические заряды, величина и знаки которых меняются соответственно изменению звука. С помощью электрических устройств колебания этих зарядов дают начало радиоволнам, распространяющимся на сотни и тысячи километров. Радиоволны воспринимаются приемником и вызывают в наушниках или громкоговорителе колебания электрических зарядов. Эти заряды в свою очередь передаются на пьезоэлектрическую пластинку и заставляют ее колебаться. Механические колебания пьезопластинки передаются на соединенную с пластинкой мембрану, а от мембраны распространяются в воздухе в виде звуковых волн.

Так пьезопластинка в микрофоне «слышит» звук и преобразует его в электрические колебания, а в телефоне такая же пластинка «поет» или «говорит» под влиянием электрических колебаний. Так же действуют пьезокристаллические пластинки в звукозаписывающих аппаратах.

(адаптерах): механические колебания иглы, бегущей по бороздкам патефонной пластинки, передаются пьезоэлементу и преобразуются им в переменные электрические заряды; электрический контур в радиоприемнике усиливает эти заряды и передает их на мембрану телефона или динамика.

Спрос на пьезоэлектрические кристаллы в технике непрерывно повышается. Именно поэтому так интенсивно разрабатываются методы искусственной кристаллизации кварца и других пьезоэлектриков.

Основоположником пьезокварцевой промышленности и промышленности роста кристаллов в Советском Союзе является академик, Герой Социалистического Труда Алексей Васильевич Шубников (1887—1970). Он первый еще в конце двадцатых годов нашего столетия привлек внимание инженеров к применению пьезоэлектрических свойств кристаллов.

А. В. Шубников учился в Москве, несколько лет преподавал в Свердловске, а с 1925 г. организовал и возглавил Кристаллографическую лабораторию при Академии наук в Ленинграде. При этой лаборатории в 1929—1930 гг. он создал «кварцевую мастерскую», которая вскоре выросла в самостоятельную лабораторию, затем дала начало нескольким промышленным институтам. В кварцевой мастерской занимались изготовлением пьезокварцевых пластинок. В начале мастерская была очень мала: алмазная пила для резки камня, два шлифовальных станка, немногие самодельные приборы для определения ориентировки кристаллов и для проверки готовых пластин. Работали в ней в первые годы 3—4 мастера. Все приемы распиловки, шлифовки и испытаний кристаллов профессор Шубников отрабатывал своими руками. В темном костюме с неизменно ослепительно белым крахмальным воротничком, строгий и подтянутый, он надевал рабочий халат и становился сам к станку. Под его руками оживали подчас непокорные кварцевые пластинки. У него были четкие, выработанные приемы, великолепная точность движений, и он никогда не уставал сам терпеливо учить молодых шлифовальщиков, перенимавших его мастерство.

«Не забывайте, — настойчиво внушал он молодым мастерам, — не жалейте времени и сил на первые,



самые грубые этапы распиловки или шлифовки кристаллов. Чем тщательнее работа в начале, тем легче пойдут следующие стадии — тонкая шлифовка и полировка».

Своими руками профессор изготовил в те годы сотни пьезокварцевых пластин, которые тут же шли на нужды радиотехники. Радиотехника была тогда еще совсем молодой, только зарождалась, но потребность в пьезокварцах была уже столь велика, что профессору Шубникову и его ученикам подчас приходилось простаивать всю ночь у шлифовального станка, выполняя срочные заказы. В этой же мастерской выросли первые ученики А. В. Шубникова. В те же годы Алексей Васильевич организовал первую фабрику искусственных кристаллов, о которой рассказано на стр. 159. Большую часть первых ее установок профессор Шубников тоже собирал сам, своими руками.

В 1934 г. в связи с переводом Академии наук СССР из Ленинграда А. В. Шубников со своей лабораторией переехал в Москву, и здесь направление прикладной кристаллографии стало развиваться еще быстрее. Под руководством А. В. Шубникова — к тому времени уже члена-корреспондента Академии наук, а затем и академика — была создана новая большая лаборатория по пьезокварцу, сегнетовой соли и рубину. Позднее эта лаборатория преобразуется в кристаллографический завод — родоначальник множества современных заводов кристаллографической промышленности в разных городах Советского Союза.

Всю свою жизнь, во всех своих работах Алексей Васильевич развивал теорию симметрии кристаллов и открывал новые явления, используя метод симметрии. В 1940 г. он высказал идею, что пьезоэлектричество может проявляться не только в кристаллах, но в любых средах с полярной симметрией.

На основе этой идеи он вместе со своими учениками создал *пьезоэлектрические текстуры*. Текстурой называется собрание мелких кристаллов, имеющих одинаковую ориентировку. Если отдельные кристаллики, образующие текстуру, обладают пьезоэлектрическими свойствами и если все эти кристаллики расположены так, что одинаковые направления в них параллельны друг другу, то вся текстура в целом ведет

себя как один большой пьезоэлектрический кристалл. Таким путем можно изготовить пьезоэлектрические детали любых размеров и форм, тогда как размеры природных и искусственных монокристаллов ограничены.

Вначале А. В. Шубников делал пьезоэлектрические текстуры крайне просто: жесткую волосяную кисть он окунал в расплав сегнетовой соли, слегка отжимал и наносил кистью расплав на подготовленную гладкую поверхность. Кистью проводил несколько раз, все время в одном и том же направлении, так что штрихи застывающего расплава накладывались друг на друга параллельно. При застывании расплава вырастали игольчатые кристаллики сегнетовой соли; если штрихи были параллельны, то и кристаллики оказывались параллельными друг другу и действовали как один большой кристалл.

Теперь для создания текстур применяют более совершенные методы. Не только в пьезотехнике, но и во многих других областях техники текстуры заменяют монокристаллы или используются наряду с ними. Текстуру легче изготовить, она дешевле, ее удобнее обрабатывать. Упорядоченно расположенные мелкие кристаллики ведут себя подобно одному большому кристаллу. Работы А. В. Шубникова и его сотрудников по созданию пьезоэлектрических текстур были удостоены Государственной премии.

Маленькая кристаллографическая лаборатория с кварцевой мастерской в Ленинграде была зародышем, из которого вырос крупнейший в нашей стране Институт кристаллографии Академии наук СССР (ИКАН), носящий ныне имя академика Алексея Васильевича Шубникова.

Но вернемся к кварцу — кристаллу, применения которого легли в основу развития промышленности искусственных кристаллов и приборов, сделанных из кристаллов.

Кварц — это, пожалуй, самый распространенный на Земле минерал. Кремень, аметист, яшма, опал, халцедон — все это разновидности кварца. Мелкие зернышки кварца образуют песок. В граните видны зернышки кварца, наряду с полевым шпатом и слюдой. А самая красивая, самая чудесная разновидность

кварца — это и есть горный хрусталь, т. е. прозрачные кристаллы кварца.

Много кварца на Земле, очень много, и все же природный кварц не может обеспечить нужды техники. Для оптических, электрических, акустических приборов нужны высокосоввершенные, идеально однородные кристаллы кварца, а такие в природе чрезвычайно редки, и ценятся они теперь буквально на вес золота.

В земной коре, в жилах и занорышах, в «хрустальных погребках» чудесные кристаллы кварца растут из горячих минеральных растворов. Нельзя ли и в лаборатории попробовать вырастить кварц из раствора? Однако в обычных условиях кварц не растворяется ни в воде, ни в сильных растворителях, даже в кислотах. Из растворов можно кристаллизовать те вещества, у которых достаточно велика растворимость. Чтобы увеличить растворимость, можно подобрать лучший растворитель или повысить температуру. У большинства веществ растворимость растет при повышении температуры (вспомните: в горячем чае растворится больше сахара, чем в остывшем).

У водных растворов при обычных давлениях нельзя поднять температуру выше  $100^{\circ}\text{C}$  — вода закипит и испарится. Однако предотвратить кипение и испарение можно, если повысить давление. Так приходим к методу кристаллизации из растворов при повышенных температурах и давлениях — к гидротермальному синтезу кристаллов.

Гидротермальным методом выращивают теперь кристаллы кварца практически любых размеров, идеально чистые и однородные, несравненно более чистые, однородные и совершенные, чем природный кварц.

Кристаллизаторами в этом методе служат громадные цилиндрические сосуды из стали или специальных жаропрочных сплавов, которые могут выдержать и сильный нагрев, и высокие давления, и разъедающее действие растворителей. Кристаллизация ведется в герметически закрытых сосудах — автоклавах высотой до 5—6 метров и диаметром до 2—3 метров. Автоклав (рис. 110) заполняют щелочным растворителем, например водным раствором каустической соды. На дне автоклава находится исходное сырье для кристаллизации. Сырьем здесь служит природный микрокри-

сталлический кварц, не пригодный ни для каких изделий. В верхней части автоклава подвешивают на стальных рамах заправки — тонкие пластинки, выпиленные из хорошего кристалла кварца, природного или искусственно выращенного. Автоклав герметически закрывают специальными затворами и нагревают, причем между дном, где лежит сырье, и верхней частью, где висят заправки, создают перепад температур: на дне температура больше, чем наверху. От нагревания раствор расширяется, уровень его поднимается, давление в герметически закрытом сосуде растет. При температурах 300—350 °С и давлениях до 2 тысяч атмосфер размельченный кварц на дне сосуда растворяется в горячем щелочном растворителе и потоки раствора поднимаются кверху; остывая в верхних, менее нагретых участках автоклава, потоки подходят к заправкам уже пересыщенными — и на заправках начинают расти кристаллы.

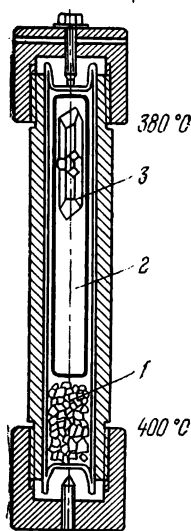


Рис. 110. Схема выращивания кристаллов кварца: 1 — исходный материал, 2 — щелочной раствор, 3 — растущий кристалл.

Мы уже говорили: кристалл, лишенный своей многогранной формы, не перестает быть кристаллом. Пластика-затравка выпиlena из кристалла, она сохранила свое кристаллическое строение, она анизотропна и скорость ее роста зависит от направления. Пластика свободно подвешена в растворе, ни соседние кристаллы, ни стенки автоклава ей не мешают, и на заправке вырастает великолепно ограненный кристалл кварца. Растет он со скоростью порядка десятых долей миллиметра в сутки. Весь цикл выращивания таких кристаллов длится месяцами, до полугода!

И все же — насколько же это быстрее, чем в природе, где рост кристалла длится миллиарды лет. А главное, в чем человек превзошел природу, — это в совершенстве выращенных им кристаллов. Много лет эталоном совершенства кристаллов был природный

192

кварц. Не в земле, не в глубинах гор, а в стальных кристаллизаторах вырастают теперь кристаллы кварца. Столь же ровны и блестящи их грани, столь же удивителен манящий блеск и «хрустальная» прозрачность, но по однородности, прозрачности, совершенству структуры они намного лучше природных.

Впервые искусственный кристалл кварца вырастил профессор Специа в Италии в 1905 г. Конечно, тогда еще не было современных мощных автоклавов. Специа растил кварц в запаянном металлическом сосуде, посеребренном изнутри.

В опыте, длившемся 199 суток, из затравки в полсантиметра толщиной вырос кристаллик в 2,5 сантиметра. По тем временам это было громадное достижение, однако ни сам Специа, ни другие исследователи не смогли вырастить кристаллы кварца покрупнее или хотя бы повторить этот опыт. Понадобилось еще четыре десятилетия, чтобы разрешить проблему выращивания кварца.

Забавно, что теперь стала ясна очень небольшая, но решающая ошибка в опытах Специа. Он не учел, что при нагреве меняется не только растворимость вещества, но и плотность раствора. В общем схема его опыта была сходна с теперешней, но он помещал затравку внизу, а сырье наверху, потоки в растворе оказались очень слабыми, вместо интенсивного роста получился застой. Быть может, если бы Специа поставил свой опыт «вверх ногами», он вырастил бы более крупные кристаллы.

Однако дело совсем не в этой ошибке. Тогда, на заре XX в., ростом кристаллов занимались отдельные ученые в немногих лабораториях и не было еще не только мощных средств нашей современной техники, но и нужды в искусственно выращенных кристаллах, потому что их еще не умели применять, многих свойств их тогда не знали. Когда же технике понадобились искусственные кристаллы кварца, тогда и создали метод их выращивания. Ныне у нас в стране проблема выращивания кварца решена полностью.

Работы по синтезу кварца в нашей стране начались незадолго до Великой Отечественной войны под руководством Алексея Васильевича Шубникова. В Институте кристаллографии Академии наук СССР

Н. Н. Шефталъ, А. А. Штернберг, В. П. Бутузов разработали методику выращивания кварца. К 1950 г. были выращены уже сотни кристаллов, из которых самый крупный весил 23 грамма. В начале 50-х годов была создана аппаратура для выращивания кристаллов кварца методом гидротермального синтеза, а к 1957 г. уже были выпущены первые партии кристаллов кварца. Теперь выращивают кварц для нужд оптики, радиотехники, ювелирной промышленности. После организации массового производства искусственный кварц стал обходиться намного дешевле, чем природный горный хрусталь. По качеству же природный кристалл не может даже сравниться с синтетическим.

Не так уж давно, в 1935 г., А. Е. Ферсман писал:

«Через несколько десятков лет геологи не будут больше с опасностью для жизни взбираться на вершины Альп, Урала или Кавказа в погоне за кристаллами, не будут добывать их в безводных пустынях Южной Бразилии или в наносах Мадагаскара. Я уверен, что мы будем по телефону заказывать нужные куски кварца на государственном кварцевом заводе».

Мечта превратилась в действительность. Такие заводы работают.

В последние годы гидротермальным методом вырастили кристаллы очень многих веществ. Для нужд техники так растят не только кварц, но и сапфир, рубин, слюду, гранаты, изумруд, топаз и многие другие кристаллы, не существовавшие ранее в природе.

### Как растут алмазы

Алмаз, самый прекрасный из драгоценных камней, служит человеку не только как самоцвет. Алмаз находит множество технических применений как самый твердый из всех известных на Земле природных минералов.

На это указывает даже название: оно происходит от греческого слова «адамас», что означает «непобедимый».

Римский ученый Плиний Старший рассказывает, что «...алмазы испытывают на наковальне, ибо они

так сопротивляются ударам, что железо с обеих сторон разлетается и самая твердая наковальня растрескивается». Но это столь же неверно, как рассказываемая Плинием басня о том, что алмаз теряет свою хрупкость, если его смочить кровью козла, да еще обязательно теплой.

Твердость не обязательно означает способность сопротивляться ударам. Несмотря на свою твердость, алмаз очень хрупкий, его легко разбить при ударе молотком. А вот распилить алмаз, отшлифовать, ограничить его или даже просто поцарапать — дело весьма трудное, потому что нет ни одного природного вещества, которое было бы тверже алмаза.

Благодаря своей исключительной твердости алмаз играет громадную роль в технике. Алмазными пилами распиливают камни. Алмазная пила — это большой (до двух метров в диаметре) вращающийся стальной диск, на краях которого сделаны надрезы или зарубки. Мелкий порошок алмаза, смешанный с каким-либо клейким веществом, втирают в эти надрезы. Такой диск, вращаясь с большой скоростью, быстро распиливает любой камень.

Колоссальное значение имеет алмаз при бурении горных пород. В коронки буров вставляют кристаллики алмаза; когда бур быстро вращается, коронки с алмазами вгрызаются в породу и просверливают ее, благодаря чему круглая коронка все глубже и глубже входит в землю. При этом столбик породы (так называемый керн) остается внутри бура и вытаскивается потом наверх; исследуя этот столбик, можно увидеть, какие породы и в каком порядке залегают на глубине. Так разведывают месторождения полезных ископаемых, определяют их границы, мощность залегания.

В горных работах твердые горные породы обычно рвут динамитом. Чтобы заложить заряд динамита в породу, нужно высверлить в ней отверстие; для этого также употребляются алмазные буры.

Тонкая проволока из таких твердых металлов, как углеродистая и хромоникелевая сталь, вольфрам, твердые сплавы, изготавливается тоже с помощью алмаза. Если металлическую проволоку протащить, или,

как говорят в технике, проволочить, через узкое отверстие, затем через еще более узкое и дальше еще и еще через всё более и более узкие отверстия, то в конце концов проволока вытянется в тонкую нить. Но если при волочении будут царапаться и снашиваться края отверстия, проволока получится неровной. Необходимо, чтобы металл не растачивал края отверстия. А значит, отверстие нужно делать в очень твердой основе. Незаменимым материалом для таких «волоочильных досок», или «фильер», оказывается алмаз. Сквозь дырочки в алмазе вытягивают проволочки диаметром от десятых до тысячных долей миллиметра. Такие тончайшие проволочки со строго постоянным диаметром и исключительно гладкой поверхностью употребляются главным образом в электропромышленности. Например, из вольфрамовых нитей делают волоски для электроламп. Через волоочильные алмазы протягиваются также нити парашютной ткани. Именно потому, что эти нити особенно ровные и гладкие, парашют раскрывается быстро и плавно. Алмазные фильеры отличаются исключительной прочностью, служат очень долго, почти не снашиваясь. За время службы одного алмазного волоочильного камня через него протягивают столько медной проволоки, что ею можно несколько раз опоясать земной шар.

В граверных инструментах, делительных машинах, аппаратах для испытания твердости, сверлах для камня и металла вставлены алмазные острия.

Алмазным порошком шлифуют и полируют твердые камни, закаленную сталь, твердые и сверхтвердые сплавы. Сам алмаз можно резать, шлифовать, полировать и гравировать тоже только алмазом. Наиболее ответственные детали двигателей в автомобильном и авиационном производстве обрабатывают алмазными резцами и сверлами.

До недавних лет алмазы добывали главным образом в Африке и Индии. Каторжный труд и бесправие рабочих на Южноафриканских алмазных копях ярко описал академик А. Е. Ферсман в своих «Воспоминаниях о камне»:

«Особенно поразили меня, — пишет Ферсман, — описания добычи камня, залегавшего в огромных воронках зеленой породы — кимберлита, отвесные стен-



ки, которых то и дело обваливались, погребая под собой десятки, а иногда и сотни кафров — рабочих. Весь труд по добыче алмаза держался на десятках тысяч кафров, живших в особых огороженных колючей проволокой сараях. Всюду констебли с резиновыми палками следили за рабочими, опасаясь, что неожиданно блеснувший в кимберлите камень ускользнет из цепких рук владельцев копей... Так добывался алмаз — сверкающая, прозрачная нерушимая разновидность углерода. Сотни миллионов долларов для крупных алмазных синдикатов, сотни тысяч загубленных жизней рабочих».

Геологи знают, что алмазы находят всегда в глубоководных алмазоносных породах — кимберлитах. Кимберлиты, глубинные породы, выходят на поверхность земли как «трубки» — гигантские колодцы, заполненные алмазоносной породой. Геологи полагают, что алмазы образуются при кристаллизации углерода, растворенного в расплавленном кимберлите, в недрах Земли при высоких температурах и очень больших давлениях. А потом эти кимберлитовые породы, прорывая в результате глубинных взрывов другие породы в земной коре, выходят на поверхность земли.

Очень долго считалось, что в нашей стране природных алмазов нет. Но все знают теперь о месторождении алмазов, открытом советскими геологами в глухой якутской тайге.

Открытие не было случайным. Сопоставляя описания мировых алмазных месторождений с геологическими картами разных областей нашей Родины, геологи установили разительное сходство «Сибирской платформы» — района между Леной и Енисеем — с алмазоносными кимберлитовыми районами Южной Африки. И геологи решили искать алмазы в Сибири. Поиски были многолетними и упорными, хотя вначале они казались безнадежными.

Топкими болотами, непроходимыми лесами шли геологи вдоль рек и ручьев в тайге в поисках алмазов. Поиски были трудны и сначала безуспешны. Но геологи не сдавались. Дело в том, что изредка им попадались вкрапленные в породу маленькие красные зернышки кристаллов пироба, вишнево-алого камня. А геологи знают: пироп — неизменный спутник алмаза,

как бы самый верный друг его. Там, где находят алмазы, обязательно встречаются алые капельки пиропы. Сам по себе пироп значения не имеет, кристаллики у него мелкие, в огранку непригодны, в технике его не применяют. Так и знают его как спутника алмаза во всех знаменитых алмазных копиях.

Но в якутской тайге попадались сначала только пиропы, одни пиропы, без алмазов. Геологи решили следить за пиропами, искать эти мелкие красные зернышки, похожие на капли крови, и, обнаружив их, идти по их следу. Так по «красной путеводной нити» шли поиски в тайге. Поиски велись в россыпях по ручьям и долинам рек.

Со склонов гор вода выносит камни, мелкие обломки, гальку, песок. По отмелям рек и на дне, в песке и гальке оседают более тяжелые песчинки и камешки, а среди них могут оказаться и алмазы. Алмаз — тяжелый минерал, его плотность  $3,51 \text{ г/см}^3$  (сравните с плотностью его родного брата — графита: всего  $2,09 \text{ г/см}^3$ ; так меняется плотность кристалла только от перестройки атомов в его структуре!).

Чтобы отделить более тяжелые минералы, песок промывают водой. Более легкий песок смывается, тяжелые минералы оседают на дно. Оседал бы и алмаз, если бы он был. Но его не было. Однако в пробных промывках песков в бассейне реки Вилюя геологи все чаще находили тяжелые кристаллики красного пиропы.

В 1953 г. молодой геолог Лариса Анатольевна Попугаева обследовала русло речки Далдын в Вилюйском районе и, двигаясь вверх сначала по речке, а затем по маленькому ручейку, находила с каждой пробой все больше и больше пиропы. Казалось — вот-вот разведчики дойдут до коренного месторождения — чего? Пиропы? Алмазы? Но — увы! — ручеек становился все уже, мельче и вот совсем пропал. Пропали и пиропы.

Что делать? Стояла уже поздняя осень, давно пора было кончать поиски, выходить из тайги. Значит, и в этом году неудача?! Усталая, разочарованная Попугаева к вечеру села отдохнуть. Взгляд ее упал на камень под ногой у рабочего. Лариса Анатольевна нагнулась, подняла камень — сомнений не

могло быть: на ее ладони лежал кимберлит. Заночевали тут же и, еле дождавшись рассвета, стали разрывать мох и почву — и тут перед разведчиками открылись сплошные выходы алмазоносного кимберлита.

Так была открыта первая в нашей стране алмазная трубка, получившая название «Зарница». Так же по красной «путеводной нити» нашли на следующий год в том же районе Вилюя вторую алмазную трубку «Мир», а дальше — трубки «Айхал», «Удачная» и еще, и еще...

В наши дни в Якутской тайге над вечной мерзлотой выросла алмазная столица — город Мирный, центр разработки алмазных месторождений.

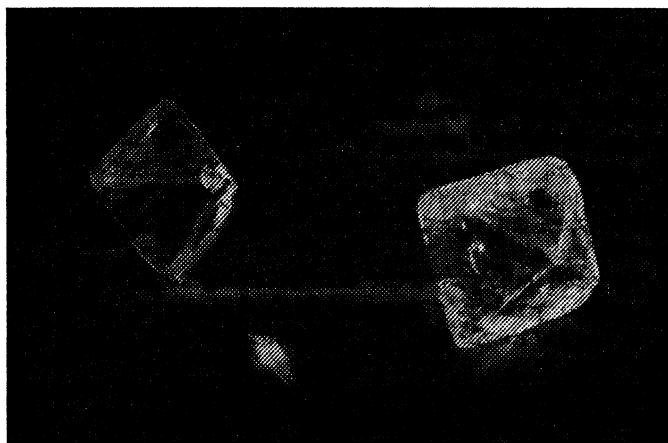


Рис. 111. Якутские алмазы «Токтогул» и «Летний».

В Алмазном фонде Советского Союза в Кремле, рядом с исторически знаменитыми алмазами «Шах», «Орлов», хранятся теперь великолепные якутские кристаллы.

Крупным алмазам по давней традиции дают поэтические имена — «Мария», «Восход», «Покоренный Вилюй», «Горняк», «Комсомольский», «Октябрь».

ский», «Северное сияние», «Лучезарный», Валентина Терешкова».

И все же даже Якутия не может полностью обеспечить алмазами колоссальные потребности нашей промышленности. Потребовалось еще и создание искусственных алмазов.

Что же такое алмаз, этот «сгустившийся солнечный свет», как говорили о нем древние легенды? Алмаз — это кристаллический углерод, он сложен из тех же атомов углерода, что и сажа, уголь, графит. Кристаллы алмаза отличаются от кристаллов графита по своей структуре (см. рис. 10): в прочной атомной постройке алмаза каждый атом углерода отстоит на одинаковых расстояниях от четырех таких же атомов. Если посмотреть на эту структуру сбоку, то видно, что атомы углерода соединены как бы в кольца, точнее — в шестиугольники. Такие же шестиугольники из атомов углерода видим мы в структуре графита, но здесь они расположены слоями, этажерками, а промежутки между этими слоями больше, т. е. связи слабее. Если надавить на кристалл графита, слои сдвигаются, легко скользят, съезжают вдоль своей плоскости; вот так и соскальзывают слои-чешуйки, оставляя след на бумаге, когда мы пишем графитовым карандашом.

Но если все различие между графитом и алмазом заключено только в расположении атомов, то нельзя ли, чуть сдвинув атомы, превратить один кристалл в другой?

Оказывается, можно. Превратить алмаз в графит можно и даже довольно просто. Алмаз, этот драгоценный камень, самый твердый из всех камней, легко сгорает, превращаясь в газообразный углерод, иногда и в графит.

Такой опыт произвели академики итальянской «Академии опыта» в XVII в. во Флоренции: на алмаз направили солнечные лучи, сфокусированные линзой, алмаз задымился и... сгорел. Такой же опыт произвел в 1773 г. русский минералог Карамышев, продемонстрировавший в Петербургском горном училище «сжигание алмаза нарочитой величины». Об этом опыте было так много толков, что известный поэт того времени Хемницер описал его в басне:

В то время самое, как опыты те были,  
Что могут ли в огне алмазы устоять,  
В беседе некоей об этом говорили,  
И всяк по-своему об них стал толковать.  
Кто говорит: в огне алмазы исчезают,  
Что в самом деле было так.  
Иные повторяют:  
Из них, как из стекла, что 'хочешь выливают.  
И так  
И сяк  
Об них твердят и рассуждают...

Итак, превратить алмаз в графит можно. А вот нельзя ли осуществить обратное превращение: получить алмаз из газообразного углерода, из сажи или из графита? Передвинуть атомы углерода и выстроить их правильным строем алмазной структуры? Эту задачу решали более ста лет.

В Британском музее в Лондоне можно увидеть кристаллы, которые много лет считались первыми в мире искусственными кристаллами алмаза. Их вырастил в конце прошлого века английский химик Хенней. Он смешивал различные парафины с костяными жирами и загружал эту смесь в прочную стальную трубу, похожую на ствол пушки. Концы этой пушки Хенней запаивал, а затем выдерживал ее в течение целого дня разогретой до красного каления. Из 80 его опытов лишь три оказались удачными. Хенней предъявил миру 12 маленьких кристалликов. «Искусственные алмазы Хеннея», как чудо, были выставлены в Британском музее. Но чудом было и то, что опыт Хеннея никому повторить не удалось. Не раз высказывались сомнения: да, может быть, это вовсе и не алмазы?! Замечательный кристаллограф, англичанка Кэтлин Лонсдэйл в 1943 г. проверила кристаллы Хеннея с помощью рентгеноструктурного анализа и убедилась: одиннадцать из двенадцати кристаллов — подлинные алмазы. Подлинные? Да, но неизвестно, естественные или синтезированные. Кэтлин Лонсдэйл высказала предположение, не был ли Хенней искусным мистификатором, не выдал ли он естественные кристаллы за искусственные. Так и остались загадкой «алмазы Хеннея» в Британском музее.

Еще раньше, в 40-х годах XIX в., естествоиспытатель В. Н. Каразин, известный русский общественный

деятель, основатель Харьковского университета, получил «сходные с алмазом» кристаллики, сжигая уголь в запаянной стальной трубе. Кристаллы эти не сохранились, и тоже остается гадать, были ли они на самом деле алмазами.

В 1893 г. внимание всего мира привлекло сообщение французского химика Муассана о том, что он получил кристаллики алмаза величиной в десятые доли миллиметра. Муассан нагревал до 2—3 тысяч градусов расплав железа, насыщенный графитом, а затем выливал получившееся углеродистое железо в ледяную воду. На поверхности слитка при этом образовывалась корка, сдавливавшая внутреннюю часть. А так как при затвердевании чугуна увеличивается в объеме, внутри застывающего слитка получились громадные давления. При таких условиях углерод, насыщающий железо, может частично выкристаллизоваться в виде алмазов.

Неизвестно, были ли кристаллики Муассана действительно алмазами. Возможно, что это были кри-

сталлики карбидов, т. е. соединения металла с углеродом. Во всяком случае повторить опыты Муассана до сих пор никому не удалось.

В 1939 г. советский физик О. И. Лейпунский теоретически рассчитал, что для перехода графита в алмаз нужно осуществить колоссальное давление порядка 45—60 тысяч атмосфер и одновременный нагрев до 1300—1700° С.

Опыты по синтезу алмаза завершились удачей лишь после того, как в 1959 г. установили диаграмму равновесной устойчивости (фазовую диа-

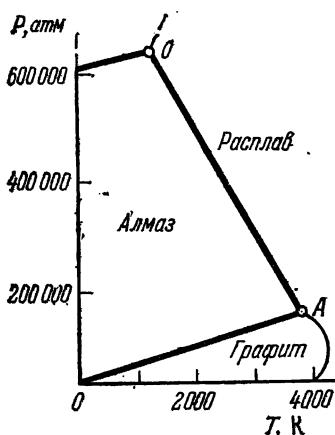


Рис. 112. Области температур, в которых устойчивы алмаз и графит.

грамму) углерода. На рис. 112 показано, в каких областях давлений и температур устойчивы алмаз и гра-

фит. Переход графита в алмаз возможен только на определенном участке линии ОА.

В наши дни проблема синтеза алмаза решена. Алмазы получают из графита и высокоуглеродистых соединений в интервале давлений от 55 до 100 тысяч атмосфер и температур от 1200 до 2800 °С. Выдерживать такие температуры и давления могут только особо высокопрочные и жаропрочные материалы.

Впервые в 1954 г. в лаборатории американской фирмы «Дженерал электрик компани» создали аппаратуру, выдерживавшую в течение 6—8 часов давление в 100 тысяч атмосфер при 2600 °С, и получили искусственные кристаллы алмаза величиной до миллиметра. Только за первые 4 года эта фирма выпустила 3,5 миллиона карат алмазов \*). Настоящие ли это алмазы? Да, рентгеноструктурный анализ подтвердил, что это такие же алмазы, как естественные. Алмазы кристаллизуют в кристаллизационных камерах высокого давления. Вначале в качестве исходного материала использовали только графит. Теперь применяют еще и катализаторы, т. е. вещества, которые сами в кристаллизации не участвуют, но облегчают растворение и кристаллизацию углерода. Катализаторами служат расплавленные металлы, такие как хром, марганец, железо, кобальт, никель, платина, тантал и другие.

В кристаллизационной камере для синтеза алмазов в цилиндр из особо жаропрочных материалов помещают мелкозернистую смесь углерода с катализатором, например с никелем. На них действует давление, создаваемое прессами. Вся камера нагревается электрическим током или индукционным методом. Применение катализаторов позволяет существенно снизить температуру и давления и ускорить процесс кристаллизации алмазов. Например, японские фирмы, удачно выбирая катализаторы, сумели синтезировать алмаз всего лишь при 800—1200 °С и давлении 8 тысяч атмосфер и даже при давлении в 50 атмосфер.

Есть и такие методы, при которых алмаз получают прямо из графита, сжимая монокристаллы графита под давлением полторы тысячи атмосфер при 1000 °С.

---

\*) Карат = 0,2 грамма, единица веса драгоценных камней.

Получают при этом великолепно ограненные чистые кристаллики алмаза, но пока всего лишь в 1—2 кубических миллиметра.

Чтобы создать более крупные искусственные алмазы, пытаются спекать мелкие зерна алмаза, смешанные с графитом; при этом для получения больших давлений применяют взрыв — подобно тому, как это происходит в глубинах Земли, в кимберлитовых трубках.

Сейчас в Советском Союзе 95% алмазно-абразивного инструмента изготавливается из синтетических алмазов и только 5% из природных. Синтетические алмазы пока еще мелки, но методы их выращивания непрерывно совершенствуются. Недалек тот день, когда в лаборатории вырастят и ювелирные алмазы.

Разрабатывая проблему синтеза алмаза, перестройки структуры графита в структуру алмаза, исследователи обратили внимание на материал, очень сходный по структуре с графитом, — нитрид бора, BN. «Белый графит», как называли нитрид бора, весьма сходен с обычным графитом и по структуре, и по свойствам, и это натолкнуло ученых сразу в нескольких лабораториях на мысль: а нельзя ли в нитриде бора произвести перестройку атомной структуры такую же, как с атомами углерода? И действительно, используя аппаратуру и технологию, применяемую для выращивания алмаза, произвели превращение «белого графита» в алмазоподобный борнитрид, который называли боразоном или эльбором. Боразон — кристалл, по структуре сходный с алмазом; он оказался тверже алмаза — немного, но все же тверже. К тому же алмаз хрупок, а боразон достаточно прочен и упруг. Главное же достоинство боразона в том, что он термически стоек почти до 2000 °C, тогда как алмаз сгорает уже при 627 °C. Поэтому боразон нашел широчайшее применение в технике. Так научное предвидение свойств кристалла привело к созданию нового материала.

### **Приборы растут в кристаллизаторах**

До сих пор в этой книге речь шла преимущественно о таких кристаллах, которые есть и в природе. Кварц, рубин, алмаз, каменная соль — все они суще-



ствуют и в виде природных минералов, и в виде синтетических кристаллов, выращенных в лаборатории или на заводе. Выше рассказывалось о том, как растут кристаллы этих веществ — кристаллы невиданных размеров, исключительной чистоты и однородности, заданной формы. Но все же здесь человек совершенствует те вещества, которые встречаются и в природных условиях.

Есть, однако, целые отрасли промышленности, которые работают на кристаллах, не существовавших раньше в природе, на кристаллических веществах, полностью созданных человеком. Человек синтезировал новые вещества, вырастил из них кристаллы, изучил, а иногда и предсказал их свойства и научился широко применять эти свойства, нашел им множество применений в технике.

В первую очередь здесь надо назвать промышленность полупроводниковых кристаллов: германий, кремний, арсенид галлия, фосфид галлия, антимонид индия и многие другие. Таких кристаллов в природе не было. Ныне же на заводах выращивают многие тонны кристаллов полупроводниковых веществ. Из этих кристаллов делают великое множество самых разнообразных приборов.

Некоторые из них, например полупроводниковые телевизоры и радиоприемники, быстро стали общеизвестными, широко распространенными и почти полностью вытеснили прежние громоздкие ламповые приборы.

Полупроводниковый кристалл — один кристалл! — может заменить не одну лампу, а целую ламповую схему со всем множеством ее деталей. Один кристалл может работать как целый радиоприемник или еще более сложная схема, например ЭВМ.

Все дело в том, что электропроводность полупроводникового кристалла очень сильно зависит от его структуры и от того, какие примеси содержатся в этом кристаллическом материале.

Заметите ли вы одного, так сказать, лишнего человека среди всего населения земного шара? Конечно, нет. Даже не в огромной Москве, а и в маленьком городке один человек может затеряться бесследно. А вот у полупроводникового кристалла германия заметен

(и очень заметен) один атом чужеродного вещества, даже если он приходится на каждые десять миллиардов атомов самого германия: добавьте в германий такое ничтожное количество примеси — и электропроводность германия возрастет в десяток раз. Если же ввести, скажем, тысячную долю процента примеси, то электропроводность кристалла германия может измениться в десятки тысяч раз, а у другого полупроводникового кристалла, кремния, даже и в миллион раз. Меняя тип и концентрацию примеси, можно менять знак и величину электропроводности.

А это значит, что в одном и том же кристалле можно создать участки с совсем разной проводимостью, различающейся и по величине, и по характеру. Для этого надо ввести в кристаллическую решетку атомы примеси так, чтобы она распределялась по кристаллу не однородно, а по заданной программе — так, как нам надо. В простейшем случае, например, в наружном слое кристалла есть примесь, внутри кристалла ее нет: в кристалле создались две зоны с разной проводимостью, образовалось соединение двух разных проводников, область электронного перехода, которая работает как катод и анод электронной лампы. Но у этой «лампы» нет проводов, соединений — все устройство заключено в одном кристалле. Как же можно создать в кристалле заданное распределение примесей?

Для этого надо *выращивать* кристалл так, чтобы при его росте примеси вводились в него постепенно, по заданной программе. Или можно в уже готовый выращенный кристалл ввести примесь путем диффузии, нанеся ее тонким слоем на поверхность кристалла. Чаще всего на одном кристалле наращивают слой другого кристалла, а потом третий и так далее, — так получаются как бы бутерброды из кристаллов, или «сэндвич-структуры». Все это один растущий кристалл — но он же и целый прибор или сложная схема. В наши дни сложные электронные схемы не соединяют, спаивая провода, а выращивают в кристаллизаторе. Прибор растет по законам кристаллизации!

Внутри кристалла научились создавать не только отдельные переходы, но и сложные схемы. Так это и

называется: твердые схемы. Узор схемы переносят на кристалл с помощью фотолитографии: как бы печатают чертеж схемы на кристалле, а потом по этому чертежу вводят в кристалл необходимые примеси или наращивают новые кристаллические слои. Техника эта чрезвычайно сложна. Нужно так вести процесс кристаллизации, чтобы регулировать распределение примесей и сочетание кристаллических структур в пределах слоев толщиной в доли микрона на микронных площадках. Крохотный кристалл — размером в доли миллиметра, а в нем размещается сложная электронная схема. То, что раньше в электронных схемах было конденсаторами, сопротивлениями, лампами, проводами, — все уплотнилось в малютке-кристалле. И все сплетение проводов тоже заменил собой все тот же кристалл.

В кристаллике размером намного меньше булавочной головки размещаются сотни и тысячи деталей и даже иной раз уже не деталей, а соединенных деталей, т. е. блоков схемы. Это — тоже новое достижение техники выращивания полупроводниковых кристаллов: новый метод конструктивного оформления электронной аппаратуры, метод микромодулей. Микромодуль — это готовая часть радиосхемы, созданная в полупроводниковом кристалле. Из микромодулей монтируются любые сложные схемы, подобно тому как школьник строит модели из деталей «конструктора» — только у детского «конструктора» детали можно в руки взять и посмотреть, а микромодули столь малы, что собрать их можно только автоматически с помощью техники, похожей на технику печатания книг. Использование техники полупроводниковых микромодулей позволило уменьшить объемы схем в тысячи раз.

Представьте себе, что большой завод сжался до объема спичечной коробочки, а то и булавочной головки — такой, примерно, выигрыш в размерах дали полупроводниковые кристаллы в радиосхемах. По сравнению с транзисторным микромодулем блоха, которую подковал тульский кузнец Левша, показалась бы мамонтом. Мастера Левшу сменила новая техника — *техника автоматизированного выращивания полупроводниковых кристаллов*

## **Человек растит кристаллы в космосе**

Небывалые успехи науки и техники в освоении космического пространства вызвали к жизни космическую технологию и космическое материаловедение. В невиданных условиях, в космических лабораториях на советской станции «Салют-4», на американской «Скайлэб», в замечательном совместном полете «Союз» — «Аполлон» ставились опыты по выращиванию кристаллов. В условиях невесомости и глубокого вакуума можно осуществлять расплавление и смешение материалов невиданной чистоты без загрязнения их материалами сосуда, можно смешивать вещества, несмешиваемые в земных условиях, например металлы с газами. В космических лабораториях были выращены полупроводниковые монокристаллы селенида германия и теллурида германия, в 10 раз бóльшие, чем удалось вырастить в земных условиях, и значительно более однородные. В космической лаборатории выращивали кристаллы антимонида индия с высочайшей степенью однородности и структурного совершенства, каких не удавалось достигнуть в земных условиях.

В условиях невесомости вырастили монокристаллы в форме сплошных и полых сфер, например для шарикоподшипников.

Полученные в космосе нитевидные кристаллы сапфира отличаются высочайшей прочностью: они выдерживают давления, в десятки раз превышающие прочность таких же «земных» материалов.

На наших глазах возникает промышленность выращивания кристаллов в космических лабораториях.

