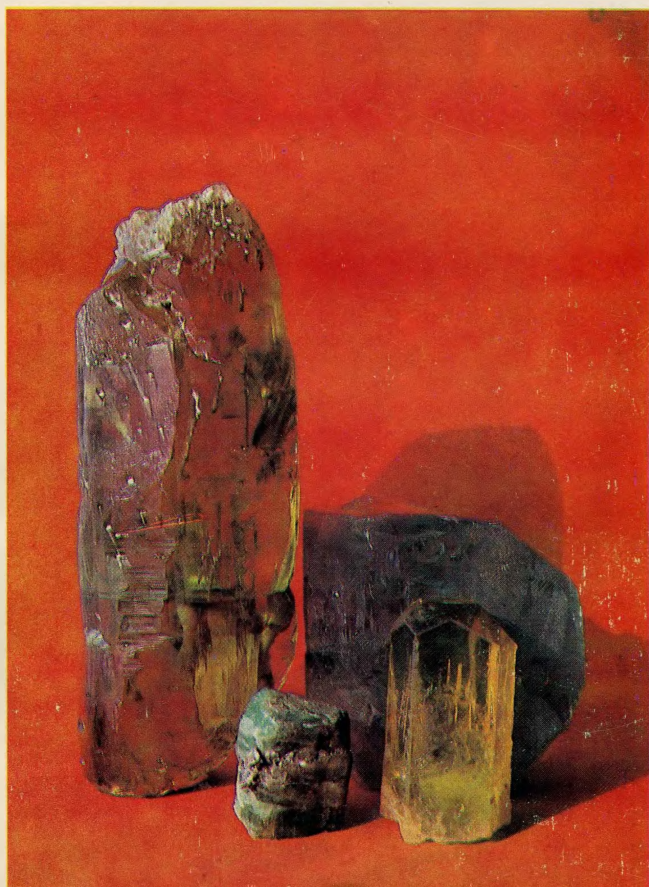


Человек и окружающая среда

Л. А. Барский

# **„Принцы” и „нищие” в царстве МИНЕРАЛОВ**





АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия «Человек и окружающая среда»

Основана в 1973 году

**Л. А. Барский**

# **«ПРИНЦЫ» И «НИЩИЕ» В ЦАРСТВЕ МИНЕРАЛОВ**

Ответственный редактор

доктор геолого-минералогических наук

**А. А. ГОДОВИКОВ**



Москва «Наука»

1988

ББК 33.4  
Б 26  
УДК 622.7

Рецензенты:

В. А. ГЛЕМБОЦКИЙ, Б. Н. ЛАСКОРИН

**Барский Л. А.**  
**Б 26** «Принцы» и «нищие» в царстве минералов.— М.: Наука, 1988.— 160 с., ил.— (Человек и окружающая среда).

ISBN 5-02-005944-7

Книга рассказывает о наиболее важных представителях царства минералов — об истории их освоения, происхождении, использовании в промышленном производстве, о том, как добывали минеральное сырье в прошлые века, и о современных методах обогащения полезных ископаемых (минералургии). В популярной форме описаны процессы извлечения золота, алмазов, угля, цветных и редких металлов, железа, марганца и других полезных компонентов из их природных смесей — руд с помощью флотации, магнитной сепарации, гравитации.

Для широкого круга читателей.

**Б** 1904020000-025  
054(02)-88 54-88 НН

ББК 33.4

ISBN 5-02-005944-7

© Издательство «Наука», 1988

Камень сейчас в руках человека — не забава и роскошь, а прекрасный материал, которому мы сумеем вернуть его место; материал, среди которого лучше и веселее жить. Это будет уже не «драгоценный камень», его время прошло! Это будет самоцвет, придающий красоту жизни!

*А. Е. Ферсман*

## **Введение**

Минералы — интереснейшие изделия природы. Они составляют основу всего неорганического мира и служат сырьем для производства металлов и почти всех материалов, из которых люди сооружают необходимые им предметы: от домов до космических кораблей. Уголь, имеющий органическое происхождение и являющийся основой энергетики и органического синтеза, называют минеральным топливом и часто тоже относят к минералам.

Когда Вы, читатель, смотрите на созданные природой кристаллы, замысловатые рисунки на отшлифованной поверхности камней, разве Вы не восхищаетесь их сказочной красотой? По своей красоте минералы могут соперничать с самыми замечательными творениями человеческого гения. Так ведь и настоящие цветы красивее самых лучших искусственных.

Благодаря значимости, широкой распространенности, красоте все минералы в совокупности называют царством. Слово это придумано не для красоты слога. Понятие «царство минералов» вошло в книгу Агриколы «De re metallica», изданную еще в 1556 г. Этот термин принят и в современной классификации минералов\*, по которой они делятся на два подцарства: элементарных веществ и соединений.

О минералах написано множество замечательных книг. Огромной любовью читателей пользуются «Воспоминания о камне» и «Занимательная минералогия» ака-

---

\* Годовиков А. А. Минералогия. М.: Недра, 1983.



демика А. Е. Ферсмана, изданные почти полвека назад. Есть книги о драгоценных и полудрагоценных минералах, об их красоте и способах обработки. Есть книги о ценных свойствах минералов, в том числе медицинских, о методах поиска и разведки различных полезных ископаемых, об извлечении металлов и других химических элементов, о производстве различной продукции из минералов. Книги об истории открытия минералов и их месторождений составляют особую, занимательнейшую литературу.

Но одной области минераловедения повезло меньше, чем другим, хотя сегодня она является одной из важнейших как в научном, так и в практическом отношении. Вы не найдете в популярной литературе книг об извлечении минералов из их смесей — руд, о способах их разделения, т. е. об обогащении полезных ископаемых. Вслед за французами, обозначившими эту область деятельности *mineralurgical*, автор назвал ее минералургией\*.

Изучением свойств минералов в связи с использованием их минералургией занимается новая ветвь минералогии — технологическая минералогия. Это основа одной из самых крупномасштабных отраслей промышленного производства — обогащения полезных ископаемых. Обогачительные фабрики в настоящее время перерабатывают за год несколько десятков миллиардов тонн полезных ископаемых: руд цветных и черных металлов, минеральных удобрений и угля.

Обогащение полезных ископаемых относится к древнейшим человеческим промыслам. Погоня за золотом, особенно в средние века, привела к изобретению огромного количества самых разнообразных и замысловатых гравитационных аппаратов для извлечения золота из природных смесей. В конце прошлого и начале нынешнего века необходимость извлечения сульфидных минералов меди, свинца, цинка, молибдена и других цветных металлов породила новый универсальный обогащательный процесс — флотацию, основанную на поверхностно-активных свойствах минералов и растворов органических соединений, т. е. способности поверхности минералов смачиваться водой и прилипать к пузырькам воздуха. Для переработки руд железа стали применять магнитные сепараторы.

---

\*. Барский Л. А. Основы минералургии. М.: Наука, 1984.

Сегодня в обогащении полезных ископаемых используются все известные виды излучений: радиоактивные, люминесцентные, лазерные и др.; учитываются химические, механические, поверхностные, магнитные, электрические и другие свойства минералов. Все это позволяет выделить практически любой минерал из любой смеси: в отдельные продукты выделяются уголь или магнетит, составляющие более половины перерабатываемой горной массы, а также алмазы или золото, содержание которых в руде менее грамма на тонну.

Технология разделения минералов, разумеется, учитывает их относительную ценность, которая определяется двумя факторами: свойствами минерала или входящих в него элементов и концентрацией в руде. По мере развития техники возникает потребность в самых неожиданных минералогических формах: есть минералы — полупроводники, минералы с уникальными оптическими свойствами, радиоактивные, поглощающие радиоактивность, природные сорбенты, легирующие и т. д.

Люди все полнее используют многообразные свойства минералов, открывая их новые полезные качества. Еще в 1763 г. М. В. Ломоносов писал: «Ныне уже, любители рудных дел, одарены вы отменным зрением, коим не токмо по земной поверхности, но и в недра ее глубоко проникнуть можете... Пойдем ныне по своему Отечеству, станем осматривать положение мест и разделим к производству руд способных от неспособных... Дорога будет не скучна, в которой хотя и не везде сокровища нас встречать станут, однако везде увидим минералы, в обществе потребные, которых промыслы могут принести не последнюю прибыль...»

Все чаще находят применение минералы «пустой породы», составляющие отходы обогащения руд и углей. Бывает и так, что «принц» и «пищий» меняются местами. Тогда возникает необходимость в создании новых процессов и аппаратов для выделения минералов, прежде бесполезных. Последовательное выделение всех ценных минералов позволяет создать безотходную технологию, комплексно использовать минеральное сырье.

Процессы разделения минералов и выделения их из смесей приобретают все большее значение по мере роста масштабов добычи и потребления минерального сырья. Запасы полезных ископаемых в земной коре, к сожалению, не безграничны и не воспроизводимы. В сферу промышленного освоения входят все более бедные и труд-

пообогатимые руды, все более тонкие и высокопроизводительные процессы и аппараты требуются для их переработки. От чисто механических, гравитационных процессов обогатители перешли к более сложным — физическим, физико-химическим, химическим. Сейчас происходит освоение новых электронных и биохимических процессов переработки руд.

Если раньше учитывались только такие простые свойства минералов, как внешний вид и плотность, то теперь начаты исследования физико-химических, полупроводниковых и кристаллохимических свойств, взаимодействия с электромагнитными излучениями различных диапазонов. Разрабатываются новые современные методы инструментального анализа: рентгеноструктурные, лазерные, кристаллооптические, люминесцентные и т. п. Возникают задачи техногенного изменения свойств минерала, перевода его в другую модификацию в интересах технологического извлечения. Для этого руду подвергают воздействию бактерий, термообработке, электрообработке и т. д. Минералогия и минералургия все ближе смыкаются друг с другом.

## Рождение минералов

Здесь, если их попробовать надрезать,  
Еще земные корки горячи,  
Горячими ключами и железом  
Пропитаны подземные ключи,  
Еще печет и варит — не потухла  
Вулканов циклопическая кухня

*В. Инбер*

### Ошибка инженера Гарина

В фантастическом романе А. Н. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина» талантливый изобретатель добывал золото и ртуть, соорудив гигантской глубины шахту, которая достигла слоя амальгамы (раствора золота в ртути). Писатель, предвосхитивший в этом романе изобретение лазеров, считал, что твердая оболочка Земли плавает на амальгаме.

Как же все-таки родились минералы? Миллиарды лет назад, когда Земля представляла собой расплавленную массу, химические элементы начали вступать друг с другом в реакции, образуя различные соединения в соответствии со своим химическим сродством, концентрацией, температурой расплавленной магмы, давлением.

Магма представляет собой огненно-жидкий силикатный расплав, содержащий различные химические элементы — их окислы, сульфиды и другие соединения, а также летучие компоненты — фтор, хлор, водяные пары, углекислый газ и пр. Если магма застывает в глубине земной коры под покровом вышележащих пород, процесс протекает медленно и образуются полнокристаллические зернистые породы. При поднятии магмы к поверхности Земли температура ее быстро падает, давление понижается до атмосферного и от магмы отделяются летучие компоненты. В процессе кристаллизации происходит перераспределение компонентов: образующиеся кристаллы удаляются из магматического очага — опускаются в более глубокие горизонты или всплывают в верхние.

Соединения более прочные и устойчивые, а также образовавшиеся из элементов, имеющихся в большом коли-



честве, выкристаллизовались первыми. Они составили основную массу горных пород. По мере остывания магмы начинали кристаллизоваться и другие минералы, располагаясь между кристаллами основной породы, формируя в них причудливые прорастания, вкрапленности. В процессе образования минералов их кристаллическая решетка часто захватывала в качестве примесей несвойственные данному минералу элементы.

Тяжелые сульфиды железа (пирит и пирротин), меди (халькозин и халькопирит), свинца (галенит), мышьяка (арсенопирит), цинка (сфалерит), кристаллизуясь из расплавленной магмы, опускались вниз, создавая скопления, ставшие впоследствии полиметаллическими рудами. После затвердевания основной части магмы оставшиеся в ней жидкие соединения выжимались из твердой породы к периферии. Так рождались, например, окислы железа и хрома — руды черных металлов.

Когда рудные минералы кристаллизуются раньше силикатов, образуются раннемагматические месторождения, такие, как руды хрома и платиноидов Урала, алмазоносные кимберлиты Якутии. Если отделение рудного расплава от силикатного происходит в жидком состоянии (как в металлургической печи, как бы образуя шлак и штейн), то формируются ликвационные месторождения. К ним относятся медно-никелевые руды Кольского полуострова и Таймыра. Если расплав рудных минералов внедряется в уже застывшие силикаты, заполняя полости и трещины, образуются позднемагматические месторождения, такие, как апатито-нефелиновые на Кольском полуострове и титаномагнетитовые на Урале.

Эта простая схема рождения руд часто нарушается потоками огнедышащей магмы, которые расплавляют уже застывшие породы, перемещивают их, приносят новые «порции» химических элементов, меняют температуру, а в связи с ней давление и другие условия образования минералов. Рядом со старыми возникают новые соединения, иногда за счет распада старых.

Но и прочно застывшую земную кору магма не оставляет в покое. Она раскалывает ее, врывается в трещины и иногда выплескивается на поверхность в виде лавы вулканов. Воздымания и опускания земной коры приводят к перемещению и перемешиванию горных пород и рудных тел. По трещинам земной коры горячая магма гонит пары и растворы. Они также несут различные элементы, образующие рудные жилы, линзы и т. п. Так

рождаются руды олова, вольфрама, молибдена, бериллия, лития, висмута, ртути, никеля и многие другие.

В соответствии с растворимостью компонентов в воде при различных значениях температуры и давления образуются гидротермальные месторождения. Существенное влияние на растворимость оказывают кислотность (pH) раствора, присутствие солей, особенно NaCl и Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, а также коллоидные образования. Большинство металлов находится в растворах в виде сложных комплексных соединений.

Внутреннее давление растворов больше внешнего, и растворы движутся к поверхности Земли по различным тектоническим нарушениям — трещинам, зонам контактов. По мере удаления от магматического очага температура понижается и происходит выпадение минералов из гидротермальных растворов. Падение температуры, снижение давления, смена химических условий среды, встреча гидротерм с подземными водами, реакции с вмещающими породами приводят к выделению минералов из водных растворов.

Высокотемпературные (500—300° С) гидротермальные минеральные образования располагаются ближе к материнскому магматическому очагу. В телах магмы, внедрившейся в гранитный массив, — интрузиях — располагаются гидротермальные жилы с вольфрамитом, касситеритом, молибденитом, на контактах интрузий с вмещающими породами и даже проникая в них — жилы с сульфидами меди, никеля, свинца, цинка, серебра, затем сурьмы и ртути.

Среднетемпературные гидротермальные месторождения образуются при значениях температуры 300—200° С на различных глубинах, а также в приповерхностных условиях. В рудообразовании принимают участие газы H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, F. Эти месторождения имеют большое практическое значение. Из них добывают основную массу цветных металлов (медь, свинец, цинк), значительную часть молибдена и олова, большую часть золота и серебра, урановые руды, а также асбест, магнетит, горный хрусталь, значительную часть плавикового шпата.

Низкотемпературные гидротермальные месторождения образуются при значениях температуры 200—50° С. Из этих месторождений добывают золото, серебро, ртуть, сурьму, исландский шпат, алунит и барит.

Изменчивы и многообразны процессы, происходящие в результате остывания магмы. Они создают тысячи ви-

дов минералов — от единичных драгоценных кристаллов аквамаринов и изумрудов до бесчисленных песчинок кварца. Но этим не заканчивается образование руд и минералов. На поверхности Земли ветер, вода, колебания температуры разрушают образовавшиеся в земной коре минералы и создают новые. Здесь идет «испытание» химических соединений на устойчивость к окислению, растворению, колебаниям температуры. Самые стойкие образуют россыпи. Благородное золото, окись титана (рутил), силикат циркония (циркон) вместе с песчинками кварца собираются в долинах рек и на берегах морей.

На дно морей и озер выпадают мел и известняк (минералы кальция), соли калия, натрия и магния, окислы железа, частички глины. Из них формируются руды солей, известняка, огнеупоров, железа и алюминия. Погребенные под слоем земли остатки растений и животных образуют пласты угля и нефти.

Все эти месторождения могут вновь опуститься в недра Земли и там подвергнуться новым воздействиям магмы, а могут подняться на вершины гор.

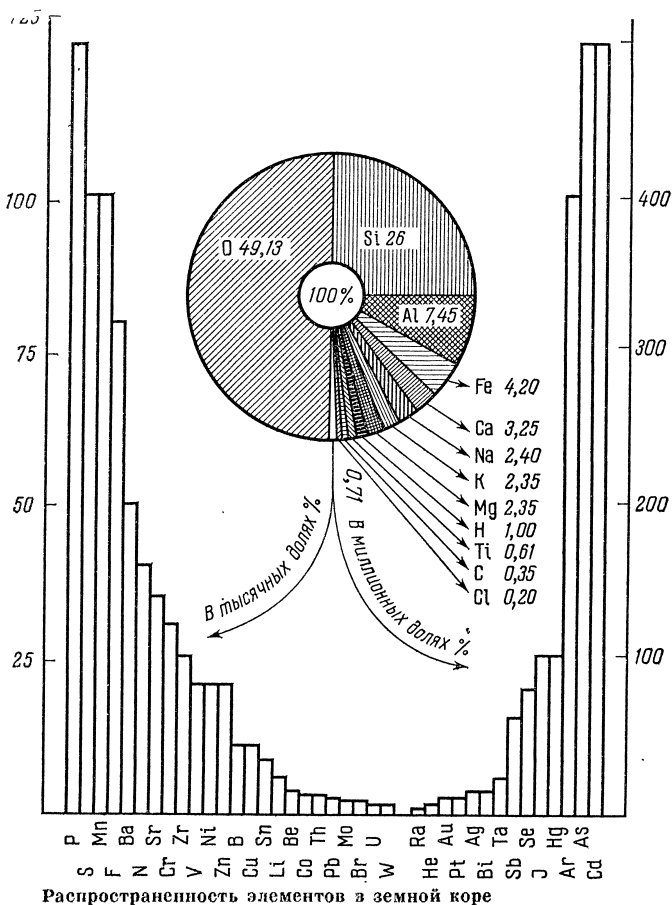
### Родные и знакомые

Распространенность элементов в земной коре в некотором роде характеризует их «дефицитность». Главными считают химические элементы, присутствующие в природных образованиях в количестве свыше 1%, второстепенными — 0,1—1%, микроэлементами — прочие, распространенность которых менее 0,1%.

Существует классификация элементов по химическому сродству. Наибольшее число элементов литосферы, имеющих химическое сродство к кислороду, образует группу оксифильных. Эта группа включает главные элементы литосферы, являясь основой вещества земной коры (подгруппа литофильных элементов): O, Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K. Часть оксифилов, имеющих тенденцию накапливаться вместе с железом, выделяется в подгруппу сидерофильных элементов: Fe, Ni, V.

Группа сульфофильных объединяет элементы, имеющие повышенное химическое сродство к сере: Cu, Zn, As, Mo, Pb, Bi. Эти элементы присутствуют главным образом в виде сульфидов, имея тенденцию накапливаться вместе с серой в сульфидных месторождениях. Отдельную группу составляют благородные металлы, включающие платино-





иды, серебро и золото, которые встречаются в природе преимущественно в самородном виде.

Микроэлементы трех перечисленных групп делятся на минералогенные и рассеянные. Минералогенные элементы (например, тантал, бериллий, селен, теллур и др.) даже в случае ничтожного среднего содержания их в земной коре образуют большое число собственных минералов. Часть атомов минералогенных микроэлементов находится и в рассеянном состоянии, присутствуя в виде примесей в кристаллических структурах других минералов.

Рассеянные элементы либо совсем не образуют собственных минералов, присутствуя в структурах минералов

других элементов в виде изоморфной примеси, либо образуют минералы, встречающиеся в природе чрезвычайно редко. Рассеянное состояние является следствием близости размеров и химических свойств их атомов и ионов к какому-либо из широко распространенных элементов. Типичными парами являются алюминий—галлий, калий—рубидий, кремний—германий, цирконий—гафний. Некоторые рассеянные элементы благодаря особенностям строения их атомов имеют двойственную природу и могут рассеиваться как в кислородных соединениях, так и в сульфидах (галлий, германий и таллий).

Гидрофильные элементы характерны для гидросферы и в большинстве своем составляют анионную часть химических соединений, присутствующих в водных растворах. Элементы атмосферы и газовой составляющей твердой литосферы образуют группу атмофильных элементов, большая часть которой представлена благородными газами.

Химические элементы в горных породах распределены неравномерно. Отклонения содержания от среднего в сторону уменьшения характеризуют рассеяние элемента, а отклонения в сторону увеличения — его концентрацию. Процессы рассеяния и концентрации химических элементов в земной коре осуществляются в результате миграции атомов под воздействием внутренних сил Земли, определяющих формирование коры земного шара, — эндогенные процессы миграции, или внешних сил, возникающих на поверхности Земли при взаимодействии литосферы, атмосферы и гидросферы, — экзогенные и гипергейные процессы миграции.

В геохимии существует понятие «кларк» — среднее содержание элемента в земной коре (кларк кислорода 46,60; кремния — 27,72). В. И. Вернадский ввел понятие «кларк концентрации» — отношение среднего содержания элемента в отдельном месторождении к кларку этого элемента в земной коре. Пользуясь этими понятиями, руду можно определить как образование, в котором кларк концентрации некоторого элемента достигает числа, достаточного для рентабельного его извлечения (см. таблицу).

Природные геохимические аномалии с концентрацией отдельных химических элементов или минералов, достаточной для экономически выгодного использования, являются месторождениями полезных ископаемых. Концентрации химических элементов в промышленных

месторождениях обычно превышают их среднее содержание в земной коре в десятки и сотни тысяч раз.

Некоторые элементы, которые играют важную роль в экономике и давно известны, в действительности достаточно редки. Например, медь менее распространена, чем цирконий, распространенность свинца сравнима с распространенностью галлия, а ртуть встречается реже, чем любой из редкоземельных элементов. Вместе с тем относительно распространенными являются некоторые малоиспользуемые элементы: рубидий в природе больше, чем никеля, ванадий значительно более распространен, чем олово, скандий — чем мышьяк, а гафний, один из последних открытых элементов, более распространен в природе, чем йод.

Оценки концентрации некоторых металлов в рудных телах

Металл	Кларк	Минимальная концентрация для рентабельного извлечения, %	Минимальный кларк концентрации
Al	8,13	20–30	3
Fe	5	18–30	4
Mn	0,1	20–35	200
Cr	0,02	20–30	1000
Cu	0,007	0,3–1	45
Ni	0,008	1–1,5	125
Zn	0,013	1–4	80
Sn	0,004	0,5–1	125
Pb	0,0016	1–4	600
U	0,0002	0,05–0,1	250

Доступность элемента для извлечения в значительной степени зависит от его способности образовывать индивидуальные минералы. Наиболее трудно извлекаются рассеянные элементы: индий, рубидий, галлий, гафний, рений и др. Рассеянных элементов гораздо больше, чем концентрирующихся в рудных месторождениях.

Магний извлекают из морской воды, где его концентрация 0,13%, и соляных отложений карналлита, выпавшего в осадок из морской воды, хотя имеются громадные по запасам месторождения оливина, содержащего около 13% магния, но извлечение магния из оливина гораздо труднее и дороже. Иногда использование определенных редких элементов обусловлено не только их

полезными свойствами, но и возможностью их попутного получения при добыче более распространенных элементов.

В земной коре в настоящее время установлено около 2500 самостоятельных минеральных видов и более 7000 разновидностей. По распространенности минералы делятся на пять групп:

1. Очень распространенные, основные составные части большинства горных пород (полевые шпаты, кварц, слюды, кальцит и др.).

2. Распространенные, существенные составные части редких горных пород или входящие в большинство горных пород в незначительных количествах (апатит, пеллит, лейцит и др.).

3. Среднераспространенные, непородообразующие, но встречающиеся в большинстве месторождений полезных ископаемых в составе руд (пирит, халькопирит, галенит, ильменит и др.).

4. Редкие, встречающиеся в сравнительно небольшом количестве месторождений или в небольших концентрациях (самородное золото, серебро, сильвин, виверит, минералы бериллия, тантала и др.).

5. Очень редкие, известные лишь в единичных точках земного шара и в небольших количествах (криолит, германит и др.).

Химические элементы в процессах геохимической миграции подчиняются закономерностям химических равновесий.

Широко распространена изоморфная форма геохимического распределения элементов. Изоморфией называется способность атомов и ионов химических элементов замещать друг друга в кристаллических решетках при условиях близости размеров составляющих кристаллическую решетку атомов, ионов и их групп, тождества знака заряда и относительно близких величин их поляризации. Изоморфия природных соединений определяет сходство химической формулы, близость геометрического типа структуры решетки и типа химической связи. Состав даже самых простых бинарных соединений по результатам анализа оказывается значительно более сложным, чем это следует из формулы соединения. Например,  $ZnS$  (сфалерит) может содержать примеси  $Fe$ ,  $Mn$ ,  $Cd$ ,  $Ga$ ,  $Ge$ ,  $Sn$ ,  $Se$ . Нередко минералы можно представить как бы состоящими из смеси двух или трех соединений — смешанных кристаллов. Например, плагио-

клазы представляют собой смесь альбита  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  и анортита  $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ .

Изоморфные ряды перемещаются и изменяются при изменении значений температуры и давления. Изоморфный природный ряд имеет более сложный характер, чем изоморфный ряд в химии, так как соответствует условиям не только физического, но и геологического и генетического характера.

Образование природных изоморфных составов минералов определяет геохимическая среда. При недостаточной концентрации какого-либо элемента или их группы для образования свойственных этим элементам решеток требуются другие, но определенные элементы. Например, в щелочных расплавах, богатых  $\text{P}_2\text{O}_5$ , но отличающихся недостатком Са, в решетку апатита попадают TR, Mg, компенсируя недостаток Са. Их содержание в таких апатитах достигает нескольких процентов, в то время как в апатитах, образующихся в геохимической среде с избытком Са, изоморфные примеси присутствуют в ничтожных количествах.

При изменении термодинамических условий происходит не только образование изоморфных соединений, но и их распад.

При высоких значениях температуры в кристаллическую решетку минералов может входить большое число изоморфных примесей и в большем количестве, чем при низких. Распад высокотемпературных изоморфных соединений происходит при более низких температурах: например, распад частично изоморфной смеси каликатовых полевых шпатов на  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  и  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  при понижении температуры. Высокотемпературные генерации минералов, область кристаллизации которых охватывает значительный температурный интервал, обладают большим числом примесей по сравнению с низкотемпературными, как правило, являющимися более чистыми. Это явление А. Е. Ферсман назвал автолизацией (самоочисткой).

В. И. Вернадский писал, что в каждой капле и пылинке вещества на земной поверхности по мере увеличения тонкости наших исследований мы открываем все новые и новые элементы. Рассеяние атомов элементов характерно не только для газов или водных растворов, но и для твердого вещества, системы кристаллических решеток. Рассеяние имеет свои пределы, различные для разных элементов, и зависит от особенностей строения

атомов и от внешних термодинамических условий. Для так называемых «малых» или «редких» элементов частичный изоморфизм является единственной формой нахождения в природе в связи с незначительной их распространенностью. Основная часть их атомов, если не исключительно все, находится в земной коре в состоянии рассеяния. Это, во-первых, типичные элементы рассеяния Sc, Ga, Hf, In, Rb, Br, I, во-вторых, радиоактивные элементы.

Значительная часть довольно распространенных и редких элементов тоже находится в состоянии рассеяния. Так, значительная часть иттрия и редких земель находится в апатите, сфене и флюорите, изоморфно замещая кальций; трехвалентный ванадий замещает в магнетите окисное железо; селен — серу в пирите. Одни и те же химические элементы могут образовывать самостоятельные минеральные виды, изоморфно замещать другие элементы в кристаллических решетках и находиться в состоянии рассеяния, например TR, Be, Mg, Fe, Al, Nb, Ta, V, Th.

В процессе накопления осадков, при тектонических нарушениях в земной коре и движении магмы образуются определенные группы месторождений. Закономерности размещения элементов приводят к совместному нахождению определенных минералов и горных пород, возникшему в результате одновременного или последовательного образования, — парагенезису.

Парагенезис имеет большое значение для поисково-разведочных работ и оценки месторождений полезных ископаемых. Если в дунитах, например, встречен хромит, то возможно нахождение в них и платины. Если габбро содержит пирротин  $\text{FeS}_n$  и халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ , то в них может присутствовать и пентландит  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ . В гранитных пегматитах, содержащих кристаллы литиевого минерала сподумена, следует искать касситерит  $\text{SnO}_2$ . В месторождениях прожилково-вкрапленных руд наряду с сульфидами меди может находиться в промышленных количествах молибденит. В колчеданных пиритных рудах, помимо основных промышленных элементов Cu, Au, Ag, S, постоянно присутствуют Zn, Cd, As и др., поэтому необходима комплексная переработка таких руд. Для латеритов характерно наличие в железной руде ценных примесей — никеля и хрома, позволяющих использовать их как природно-легированные руды.

## Люди и камни

В камне есть своя жизнь, темная и неисследованная, проявляющаяся в форме кристаллизации, в соупутствии известным горным породам, в аптипатии к другим, в отношениях к свету, электричеству и химическим реагентам... Мертвая земля смотрит на человека этими цветными глазами, говорящими о тайниках скрытой в ней жизни. Это — «последняя улыбка» цепенеющей в мертвом холоде неорганизованной природы...

*Д. Н. Мамин-Сибиряк*

### Каменный век и 100 000 лет спустя

В эпоху древнего каменного века — палеолита — использовались 13 видов различных минералов и горных пород. Полмиллиона лет назад первым полезным минералом стал кварцит, из которого вытачивались топоры и наконечники для копий. Остатки примитивных орудий из кварцита найдены археологами на стоянках синантропов и питекантропов. Использовались не только камни, найденные в осыпях скал, но и кремниевые желваки, добытые из меловых и известняковых отложений. Сами известняки стали первым строительным материалом. Нашли применение песок, глина, базальт, каменная соль.

В бронзовом веке человеку стали известны медь и золото, а также нефрит и некоторые цветные камни.

В период 3500—3000 лет до нашей эры велась широкая мировая торговля драгоценными камнями, она охватывала Вавилон, Ассирию, Индию и Египет. Египтяне искали и высоко ценили различные самоцветы, особенно синие и голубые, например ляпис-лазурь, бирюзу. В то время снаряжались целые геологоразведочные экспедиции. Одну из них (египетскую, в Синай за бирюзой) возглавлял первый в истории «геолог-разведчик» и мореплаватель Гароэрис. Разведочные работы того времени велись с большим размахом. Установлено, что египтяне прошли сотни разведочных шахт для добычи изумрудов на побережье Красного моря. Глубина некоторых шахт при этом превышала 200 м.

На территории Советского Союза древние разведчики, «рудознаты», судя по раскопкам, открыли многие рудные районы, а также россыпи на Урале, в Казахстане, Средней Азии и Сибири.

Множество месторождений в предшествующие века обнаружено охотниками, скотоводами, пахарями, лесниками. Это относится прежде всего к давно разрабатываемым полезным ископаемым: железным, медным, оловянным, свинцовым, золотым, серебряным рудам, самоцветам, каменному углю, глинам, известнякам, пескам.

Некоторые из полезных ископаемых разрабатывались давно, как, например, олово в Корнуолле (Великобритания) и медь в Есиока (Япония), — за тысячу лет до нашей эры, а железо в Энгерлянде (ФРГ) — более чем за две тысячи лет.

Но и в недавнее время, уже в нашем веке, подобные открытия не редкость. Так, Карагандинское угольное месторождение было обнаружено пастухами-казахами. Они находили в степи черные блестящие камни и издавна знали их замечательное свойство — гореть в костре, давая тепло в холодные ночи.

Несметны и неисчерпаемы богатства Земли. Содержание в земной коре, считая до глубины 16 км, даже самого редкого элемента — радия — составляет 55,5 млн т, золота — около 500 млн т, меди — 2 000 000 млрд т. А таких элементов, как алюминий, железо, кальций, в недрах Земли содержится гораздо больше — сотни миллионов миллиардов тонн.

Однако использовать эти колоссальные богатства не так просто. Природа тщательно перемешала все элементы, соединила их друг с другом прочными физическими и химическими связями, одни оставила почти у поверхности Земли, другие запрятала глубоко в ее недра. Кислород по процентному содержанию составляет почти половину земной коры, но тот кислород, который содержится в горных породах, хотя и в количестве большем, чем в воздухе, связан с другими химическими элементами и непригоден для дыхания. Из алюминия, составляющего почти 8% земной коры, нельзя сделать даже простой ложки, если не извлечь его из глин.

Однако природа сама помогла человеку освоить полезные ископаемые, сконцентрировав их в месторождениях. Почти все минералы могут образовывать более или менее крупные скопления — самородки золота и меди, кристаллы каменной соли, глыбы галенита, горы магнитного железняка. Их в первую очередь и использовали люди. К сожалению, сейчас все реже удастся находить такие крупные образования ценных минералов, а потребность в минеральном сырье возрастает.



Приходится извлекать из земной коры все более и более сложно извлекаемые элементы. Полмиллиона лет назад кварцит стал первым полезным минералом, из которого изготавливались топоры и наконечники для копий. Всего лишь три века назад люди использовали только девятнадцать элементов из девяноста, имеющих в природе. Ныне используются почти все элементы, притом в огромных количествах.

Запасы даже такого нехитрого ископаемого, как камни, пригодные для изготовления первобытных орудий, которых, казалось, было достаточно в осыпях и долинах рек, со временем иссякли. Первобытным людям пришлось заняться горным промыслом, добывать желваки кремния из меловых и известняковых отложений. С разработки таких «каменных» месторождений началась история развития горного промысла, а ручной сортировкой камней положено начало обогащению полезных ископаемых.

Извлечение золота из золотосодержащего песка стало для людей первой школой извлечения полезных ископаемых из руд. Уроки, полученные в этой «школе», пригодились, когда настала очередь извлекать полезные минералы из бедных руд.

С развитием техники становится все более стремительным рост производства металлов. В 1840 г. во всех странах было выплавлено всего 2,3 млн т стали, а в 1960 г. — уже 225 млн т. В 1985 г. только в одной нашей стране выплавлено 160 млн т стали.

И все же из огромной сокровищницы земной коры, содержащей примерно 775 000 000 млрд т железа, человечество пока взяло немногим более 5 млрд т. Капля в море! Но все дело в том, что запасы богатых железных руд, из которых можно легко и дешево получать высококачественную сталь, ограничены.

Что же такое руда? Во всякой горной породе в том или ином количестве содержится железо, но не всякая может считаться железной рудой. Руда — это такая порода, из которой возможно и экономически выгодно на данном уровне развития техники извлекать полезные минералы. Следовательно, с развитием техники изменяется оценка горных пород, и то, что раньше не было рудой, становится ею. Например, раньше железной рудой считали только такую породу, которую можно было загружать непосредственно в доменную печь и выплавлять чугуны. Такая руда содержала около 60% железа — почти одни только железные минералы. Потом, с разви-

тием металлургии, научились выплавлять железо из более бедной руды, содержащей кроме железных минералов некоторое количество кремнезема и известняка. Для того чтобы получить чугуны из такой руды, добавляли в плавку некоторое количество флюсов известняка и других компонентов, связывающих примеси. При современном колоссальном производстве железа, конечно, уже не хватает богатых руд. Теперь железной рудой считается и такая, где железа всего 30—40%.

Древние люди пользовались медью, находящейся только в самородках, т. е. считали рудой почти 100%-ную медь. Затем медь стали выплавлять из других минералов, в которых ее содержание вдвое-втрое меньше; в начале нашего века медной рудой считали породу с содержанием меди 5—10%, а сейчас научились перерабатывать руду, содержащую менее 0,5% меди. Такая руда не может сразу подвергаться металлургической переработке: она должна обогащаться на фабрике, где медные минералы отсортировываются от других. Полученный медный концентрат содержит уже не 1, а 20—30% меди и идет на плавку в отражательную печь.

При современном гигантском производстве металлов уже почти не осталось руд, которые можно сразу плавить, минуя стадию обогащения. Руды свинца содержат 1—2% этого металла, а на плавку идет 60%-ный концентрат. Молибдена в руде — десятые и сотые доли процента, а металлургам нужен концентрат, содержащий не менее 47—50% молибдена и не слишком много мышьяка и фосфора, так как эти примеси вредны для специальных сталей, в которые добавляют молибден.

Металлурги прошлого века никогда не признали бы рудой породу, в которой содержатся доли процента ценного металла, а сейчас большинство металлов извлекается именно из таких руд. Этим занята самая молодая отрасль горной промышленности — обогащение полезных ископаемых. Сейчас все полезные ископаемые проходят стадию обогащения. Даже уголь, который залегает в земле целыми пластами. Даже один из самых распространенных минералов — полевой шпат, применяемый в керамической промышленности.

### **Металлургия и минералургия**

Металлургия является древнейшим промыслом. В гробницах древних индусов и финикийян обнаружено холодное оружие из стали, возраст которого около 4000 лет.

Очевидно, технологический процесс выплавки железа из богатых железных руд был освоен еще на заре цивилизации. Руду смешивали с восстановителем, например древесным углем, и нагревали. Окислы восстанавливались до металла, и из его расплава формовали готовое изделие. Если примесей в руде немного, то добавлением (шихтовкой) некоторых компонентов можно получить шлак, который легче металла и всплывает на поверхность расплава. Например, кварц можно сплавить с известью и получить легкоплавкий  $\text{CaSiO}_3$ .

Выплавка металлов из руд получила название «металлургия» (от греч. «эрго» — работа, дело). Отрасль промышленности, вырабатывающая железо, марганец и хром, — черная металлургия. Производство 70 других металлов, в том числе меди, алюминия, цинка, свинца, никеля, золота, относится к цветной металлургии.

С помощью того же греческого корня образуется слово «галургия» — выработка солей (по-гречески «гало») галогенидов — фтора, хлора, брома и йода. В основе галургии лежат процессы растворения и кристаллизации солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{NaBr}$  и др.

Для металлургии самым важным свойством руд и минералов является химический состав. Например, сульфиды железа малопригодны для плавки, так как сера делает хрупким и ломким и чугун, и сталь. Слишком дорого обходится выплавка чугуна и из руды, в которой содержание железа менее 30—40%. Такие руды, прежде чем пустить на плавку, необходимо «обогащать» — отобрать из них железные минералы и отбросить пустую породу. Об этом знали еще древние металлурги. «Плавить негодную руду вместе с годной невыгодно, — писал в середине XVI в. Агрикола. — Поскольку природа рождает металлы по большей части не в чистом виде, а в смешанном с землями, загустелыми растворами и камнями, необходимо эти ископаемые по возможности отделить еще до плавки».

Разделение природных смесей на минералы, основанное на различии их физических и химических свойств, можно назвать, используя тот же греческий корень, минералургией.

Большинство минералов различаются по внешнему виду. Но внешний вид — цвет, блеск, форма кристаллов, спайность, зернистость — играет самую незначительную роль в сортировке минералов. Разнообразие других физических и физико-химических свойств минералов не ме-

нее велико, чем внешние признаки. Такие свойства, как плотность, электропроводность, магнитная пропускательность, смачиваемость водой, жиром, ртутью и другие, используются в различных аппаратах для сортировки минералов.

Минералы, обладающие близкими свойствами, например плотностью, в этих аппаратах собираются вместе, в один продукт. Этот продукт, называемый концентратом, богаче ценным минералом, чем исходная руда. Произошло частичное обогащение руды. Продукт, обогащенный ценным минералом, состоящий в основном из пустой породы, получил название «хвосты».

Если в концентрат с минералами, близкими по плотности, входят минералы с различной электропроводностью, то можно провести дальнейшее обогащение — разделение минералов по электропроводности. Так, используя различные физические свойства, можно получать все более и более богатые концентраты.

Но минералы — это еще не чистые металлы, а их химические соединения, которые можно разрушить только химическими методами. Этим занимаются металлурги, применяющие растворы кислот и солей или высокие температуры для выделения металлов из концентратов.

Граница между физикой и химией минералов — это граница между минералургией и металлургией. Разумеется, эта граница, как и вообще все границы в науке и технике, весьма условна. Она стирается все больше и больше, как и граница между современной физикой и химией. Все теснее переплетаются между собой смежные отрасли науки и техники. Они не могут существовать друг без друга — физика и химия, минералургия и металлургия.

Разделение компонентов по их свойствам (плотности, магнитной восприимчивости, электрической проводимости, смачиваемости и т. д.) основано на создании градиента концентрации, т. е. расслоении частиц минералов, ионов или молекул в жидкой или газовой средах, а также их концентрировании на границах раздела фаз: жидкость—газ; твердое тело—жидкость. «Растаскивание» частиц различных минералов, их размещение в различных зонах обогатительных аппаратов производится с помощью силовых полей: магнитных, электрических, гравитационных, адсорбционных и т. д. Комбинированная переработка осуществляется при использовании нескольких свойств с применением сочетания полей в од-

ном аппарате (комбинированный процесс) или в ряде последовательно расположенных аппаратов (комбинированная технологическая схема). Комбинированное обогащение минерального сырья производится без изменения фазового и химического состава входящих в руду минералов, т. е. в результате сочетаний обогащительных методов. Комбинируемые обогащительные схемы обычно включают в качестве первичного процесса гравитационный (обогащение в тяжелых суспензиях, отсадку, обогащение в винтовых сепараторах, на шлюзах и т. д.), а затем магнитную сепарацию или флотацию. Такие схемы обогащения типичны для железных (гравитация—магнитная сепарация), марганцевых (гравитация—флотация) и редкометальных руд (гравитация—магнитная или электрическая сепарация—флотация).

Если обогащительными методами или их комбинацией не удастся получить кондиционные концентраты, применяется гидро- или пирометаллургическая доводка. Гидрометаллургическая доводка — это выщелачивание вредных компонентов из черновых концентратов, например фосфора или кремнезема из железных, марганцевых, вольфрамовых концентратов. Комбинируемые схемы, в которых последовательно применяются различные методы, позволяют наиболее полно извлекать ценные компоненты из минерального сырья; комбинируемые процессы дают наиболее высокую чистоту концентратов.

Технологию переработки соответствующих руд, схему минералургии определяют история образования месторождения, химия и физика процессов кристаллизации рудного тела — как говорят геологи, генезис месторождения — и связанный с этим парагенез минералов и элементов. Более того, генезис руды определяет концентрацию минералов, их взаимное прорастание, вкрапленность, а следовательно, схему рудоподготовки, последовательность методов обогащения, всех технологических операций.

По существу, природные и технологические процессы подчиняются одним и тем же физическим и химическим законам с той разницей, что в природе они могут протекать тысячелетиями до установления термодинамического равновесия, а в технологических процессах время зависит от производительности аппаратов.

Различным генетическим типам месторождения присущи определенные процессы природной концентрации элементов и минералов.

Гравитационные свойства минералов играют решающую роль при образовании осадочных месторождений — россыпей всех видов. Магматические процессы являются некоторым аналогом пирометаллургических, но происходят при высоких давлениях. К собственно магматическим относятся процессы непосредственной кристаллизации минералов из магмы.

Концентрация элементов в природе связана главным образом с процессами гравитации, выщелачивания, фильтрации, осаждения, сорбции, сублимации (возгонки), плавления и кристаллизации. Эти процессы имеют определенные технологические аналоги, но их значение существенно различно в геологии и минералургии.

Из большого числа известных в природе минералов в промышленных месторождениях встречаются лишь несколько сот. Для технологии обогащения руд представляют интерес минералы, содержащие ценные компоненты, и минералы вмещающих пород. Таких минералов (не считая разновидностей) насчитывается около 250.

При переработке минерального сырья существенны не только отдельные свойства минералов, но и их сочетания, а также крупность частиц. Далее мы покажем, какие физические свойства можно использовать при обогащении смеси минералов, в каком диапазоне крупности «работают» те или иные обогатительные процессы и аппараты.

## Люди гибнут за металл

Твой блеск и жадный, и усталый,  
Металл проклятый, символ зла!  
Э, благородные металлы,  
Неблагородные дела!

*В. Павлинов*

## Самородки

Подцарство самородных минералов, состоящих из атомов одного сорта металлов или неметаллов, самое малочисленное. Из металлов промышленное значение имеют благородные — золото, серебро, платиноиды и их сплавы. Самородное железо встречается в метеоритах. Из неметаллов важнейшими являются модификации углерода: уголь, графит и алмаз. До сих пор добывается и самородная сера.

Когда люди освоили огонь и научились плавить металл, на смену каменному веку пришел бронзовый. Самородки меди и золота встречались во многих местах земного шара, сравнительно легко извлекались из россыпей и обладали многими ценными для человека свойствами. Из них можно было выковывать оружие и другие предметы. Потребность в них быстро росла. Особую ценность приобрело благородное, нержавеющее золото, которое на многие века стало предметом неистовой страсти и раздора людей. Сколько пота и крови было пролито ради золота, ставшего эквивалентом всех ценностей. «Золотая лихорадка», время от времени трясущая целые государства, бросала на поиски золота десятки тысяч людей. Буквально по зернышку были выбраны более или менее заметные крупинки желтого металла. Сначала его собирали вручную. Жители Африки, например, складывали крупинки золота, найденного в низовьях Голубого Нила, в трубочки перьев. Особенно богаты крупнозернистым золотом были нынешние территории Перу и Колумбии в Южной Америке.

### Золото инков

Империя инков существовала к западу от Анд в XIII—XVI вв., не зная ни торговли, ни денег. Инки поклонялись своим богам и императору «Великому Инке», которого считали сыном Солнца. Золото не имело никакой цены — оно было священно, принадлежало Великому Инке и собиралось в храмах.

Великий Инка Хуайна-Капак перед смертью разделил свою империю на две части: южную со столицей Куско отдал сыну Хуаскару, северную с городом Кито — сыну Атауальпе. Между братьями немедленно вспыхнула яростная вражда. Атауальпа предательски напал на Хуаскара, взял его в плен и заковал в цепи. Он ждал подхода своего полководца Руминьяуи, чтобы во главе объединенных войск войти в поверженную Куско.

Именно в это время на побережье высадился со своими солдатами Франциско Писарро, испанский конкистадор, «рыцарь золотого меча», назначенный испанским королем Карлом V губернатором Перу.

Писарро пригласил Великого Инку Атауальпу на пир. Атауальпа, подчеркивая свое миролюбие и доверие, прибыл в золотых носилках на главную площадь города

Кахамарки, занятого конкистадорами. Великий Инка и его вельможи явились без оружия. Испанцы сразу набросились на гостей, перебили свиту. Атауальпа был заключен коварными завоевателями в собственном дворце в Кахамарке. У дверей комнаты Атауальпы встали испанские стражники.

— Дай мне свободу, чужеземец,— просил Великий Инка.— Я не сделал тебе ничего плохого.

— Свободу покупают, Инка,— ответил однажды Писарро.— Я освобожу императора Атауальпу, когда он наполнит эту комнату золотом.

— На такую высоту?— Инка поднял руку. Красной линией, которая очерчивала стены комнаты на уровне его вытянутых вверх пальцев, обозначился объем около 30 кубических метров.

Посланцы Великого Инки понесли по всей империи цветные шнуры с узелками — приказ Атауальпы собирать золото.

Никто не оспаривал воли правителя. Груда драгоценного металла росла, но через два месяца комната еще не была заполнена золотом.

— Подожди еще,— умолял Инка,— уже все дороги, ведущие в Кахамарку, забиты носильщиками! Они сгибаются под тяжестью золота.

— А ты знаешь, Инка, что твой брат Хуаскар тоже не отказался от своих прав на перуанский трон? Его послы обещали выкупить трон за цену более высокую. Они хотят заполнить эту комнату до самого потолка, если мы освободим Хуаскара...

Несколько дней спустя Хуаскар был убит в тюрьме Куско по приказу Атауальпы. А комнату Инки заполнили золотом, как было обещано. Писарро стал владельцем сокровища, какое не снилось ни одному европейскому монарху.

Через несколько дней на той самой площади в Кахамарке, где девять месяцев назад Атауальпа появился в золотом палаткине, была построена виселица — гаротта. Обвиненный трибуналом Писарро в незаконном захвате перуанского трона и множестве других грехов, подошел к ней Инка Атауальпа. Ему на шею накинули петлю...

С этого дня испанцы кинулись грабить золото инков. Но металл, которым прежде были забиты храмы Куско и Кито, исчез. Исчезли и те семьдесят тысяч нош золота, которые воины Руминьяуи несли в Кахамарку, чтобы выкупить Атауальпу.



Испанцы жестоко пытали индейцев. Но, умирая, они говорили только: «Остальные знают». Остальные говорили то же самое и погибали мучительной смертью. Они умирали не за деньги — за святыню.

До сих пор искатели приключений роют перуанские горы. Президент клуба искателей сокровищ Роберт Шарру решил все же заработать деньги более верным способом. Он написал книгу, в которой, в частности, сообщил, что в 1930 г. в Лиме истощенный и полубезумный авантюрист-европеец, умиравший от тропической лихорадки, рассказал в бреду, что пробился в джунгли и видел там храм, облицованный золотом. Всех его спутников убили индейцы, защищающие храм по сей день.

Поиски ведутся уже более 400 лет. Известно, что из древней столицы инков исчезла священная цепь, которая в дни праздников протягивалась через главную площадь города. Как повествуют индейские легенды, цепь была из золота и, чтобы поднять ее, требовалось двести человек. За все время лишь один доп Хозе Эузебио де Льяно Сапата нашел в 1766 г. богатый клад в окрестностях Куско.

В перуанских Кордильерах известно одно странное физическое явление: в сумерки над горными скалами появляется зеленоватый огонь. Суеверные жители гор уверяют, что это «свет золота», спрятанного инками. Легенды подхлестывают искателей сокровищ. В XX в. золото инков разыскивали американец Брукс, австриец Тур де Косс, француз Ришар Д'Орсей. В 1933 г. экспедицию организовал итальянец Бошетти, в 1937 г. — шотландец Лох. Уже в 60-е годы перуанские клады пытался разыскать швед Рольф Бломберг.

По современным масштабам добычи 500 т золота Атауальпы — не такое уж недостижимое богатство. Разработки золотых руд в современном Перу и вовсе незаметны по сравнению с другими золотоносными районами Земли.

### Эльдорадо

Этим словом, буквально означающим «позолоченный», испанские завоеватели окрестили вождя индейского племени Муиска. По традиции в день прихода к власти он покрывал все тело золотой пылью и выплывал на плотике на середину священного озера, образовавшегося в кратере потухшего вулкана. Здесь в благодарность богам вождь выбрасывал золотые самородки, предметы культа

из золота, а заодно и изумруды, также добываемые в этих местах. Потом вождь сам окупался в священные воды, смывая с себя позолоту. Так было много веков подряд.

Узнав об этом, европейцы пришли к естественному выводу, что подобные излишества могут себе позволить только дикари, обладающие несметными сокровищами. В 1533 г. в сказочное «Эльдорадо» (так стали называть богатые золотом страны) отправились сразу две экспедиции: из Киото во главе с Себастьяном Белалькасаром и из Санта-Марты (с побережья Карибского моря) во главе с Гонсало Хименесом де Кесадой. Действуя по принципу «разделяй и властвуй», испанцы натравливали племена муиска друг на друга и, наконец, имея отряд всего в 160 человек, разбили силы самого могущественного касика Сипы Тискееусы, вошли в его крепость Баката.

Но золото исчезло. Попытки пленных индейцев ничего не дали. Эльдорадо осталось сказочной страной. Хранило свою тайну и священное озеро.

За прошедшие века здесь побывало множество кладоискателей. Последний раз перед первой мировой войной мощную атаку на сокровища Эльдорадо предприняла английская компания «Контрэкторс лимитед». Был пробурен наклонный туннель, и вода вылилась из озера, как из раковины с вынутой пробкой. Однако скрывавший сокровища многометровый слой донного ила оказался слишком топким и глубоким. Ему дали подсохнуть, но прочная, словно камень, корка оказалась не по зубам бурильному оборудованию. Постепенно озеро вновь заполнилось водой.

Легендарное озеро лежит в труднодоступном месте, в горах, на высоте свыше 3000 м над уровнем моря. Оно имеет правильную круглую форму. Цвет воды необычный, туманно-зеленый. Это, собственно, не вода, а взвесь донного ила, в которой не видно даже опущенной по локоть руки. Берега озера пустынные, машине сюда не подъехать ближе чем на 5 км. Искать сокровища дорого и ненадежно.

Так исчезли самородки золота.

Хотя они попадают и сейчас, но не имеют большого промышленного значения. Только за 15 лет (с 1932 по 1947 г.) добыто золота больше, чем за предшествующие 400 лет, а ведь в эти четыре столетия входят годы ограбления ацтеков и инков, когда целые караваны ко-

раблей отправлялись за золотом из Европы в Америку, годы «золотых лихорадок», освоения легендарных богатств Калифорнии, Клондайка, Сибири, Австралии и Африки. Уже с начала XVII в. механические способы извлечения золота оказались более эффективными, чем поиск самородков. Эти способы до сих пор не утратили своего значения на многих месторождениях.

### Злая шутка Джона Месснера

«Такой сумасшедшей гонки я еще никогда не видывал. Тысячи упряжек мчались по льду, собак не видно было из-за пара. Трое человек замерзли насмерть той ночью, и добрый десяток навсегда испортил себе легкие! Но разве я не видел собственными глазами дно проруби? Оно было желтое от золота, как горчичник. Вот почему я застолбил участок на Юконе и сделал заявку. Из-за этих-то заявок и пошла вся гонка. А потом там ничего не оказалось. Ровным счетом ничего».

Так начинается рассказ Джека Лондона «Однодневная стоянка». Откуда же взялось на дне проруби чистое золото? Оказывается, в избушке неподалеку от этой проруби случай свел Джона Месснера с убежавшей от него женой и соперником. Мстя жене, Месснер продал ее за золотоносный песок. Покидая стоянку, он высыпал «выручку» в прорубь на дно ручья. Вода отнесла песок в сторону, оставив на дне проруби почти чистое золото. Этот обогащенный золотоносный песок и стал причиной бешеной гонки золотоискателей, принявших его за выход крупного месторождения золота.

Ошибка произошла из-за того, что в природе подобные «шутки» — обычное дело. Реки, быстро текущие со склонов гор и замедляющие свой бег в долине, оставляют тяжелые минералы, в частности золото, вольфрамит, касситерит, в местах замедления течения. Легкие минералы уносятся дальше в долину. Так образуются обогащенные месторождения этих минералов. Через некоторое время река меняет русло, а месторождение остается.

Подобным способом издавна пользовались для «промывки» золота. В 70-х годах прошлого столетия американские золотопромышленники стали устраивать промысловые фабрики на склонах гор. Струей воды пески с золотом гнали в суженное металлическими или деревянными щитами отверстие, откуда пески попадали на шлюз — лоток с поперечными нарифлениями, улавливаю-

ций частицы золота. Так как самой трудоемкой операцией в этом случае становится подъем воды на большую высоту, создавали специальные ирригационные сооружения, отводящие воду на крутые склоны. Оттуда она быстро стекала вниз, промывая по дороге золотоносную руду. Такие сооружения стали настоящим бичом для земледелия в плодородных калифорнийских долинах, так как золотопромышленники заботились только о золоте и не обращали внимания, куда устремляется бурный поток после промывки. По требованиям землевладельцев правительство США в 1882 г. было вынуждено издать специальный указ, запрещающий строительство подобных сооружений.

«Царь металлов» «по совместительству» является и царем минералов по плотности, а также устойчивости к земным морозам, ветрам и дождям.

Природа, как назло, сосредоточила месторождения золота в самых неприятных, богом забытых местах: знойных пустынях Африки, неприступных горах Южной Америки, в холодных краях Аляски и Колымы. Да и в «обетованной» земле Калифорнии жажда золота так скрутила людские судьбы, что и этот край не назовешь счастливым. За несколько веков до начала промышленной добычи с помощью машин и механизмов люди перекопали, перегрузили, перетаскали на своих плечах миллиарды тонн золотоносных пород. Еще недавно в пустынных местах Витватерсранда (ЮАР) негрятянки таскали тазы с рудой с рудника на обогатительную фабрику. Но сегодня добыча поставлена на широкую ногу, механизирована, и ни одно другое производство не может сравниться с ним по производительности труда, т. е. количеству добытой и переработанной горной массы на одного рабочего.

В смеси с невзрачной породой золота и не разглядеть. Подержишь в руке золотоносный шпих, пересыплешь в пальцах песок — ну что в нем замечательного? А когда возьмешь с лотка, и вовсе золота не видно. Какая-то тяжелая желтая грязь, редко сверкнет в ней золотинок. Отмывать надо, говорят золотари.

Изобретательный человеческий ум придумал сотни хитроумных устройств для извлечения нескольких граммов золота, затерянных в каждой тонне породы. Все эти устройства до последнего времени были основаны на использовании высокой плотности золотин по сравнению с плотностью минералов породы. Способы обогащения,

разработанные для извлечения золота, впоследствии применялись и для многих других полезных ископаемых. На этом основаны самые простые и вместе с тем самые старые методы обогащения. Большинство ценных минералов, в состав которых входят металлы, в несколько раз тяжелее пустой породы. Так, самородное золото имеет плотность  $15-18 \text{ г/см}^3$ , т. е. в 6 раз тяжелее сопутствующего ему кварца. Существенно, что в воде соотношение плотностей увеличивается. Поскольку по закону Архимеда вес тела в воде уменьшается на величину веса вытесненной жидкости, т. е. на 1, то для золота и кварца это соотношение становится таким:  $(17-1)/(2,65-1) \approx 10$ .

Как правило, обогащение золотых руд производят в воде. Промывку золотых руд водой вели еще древние египтяне в XI в. до нашей эры.

### Золотое руно

В мифах Древней Греции часто упоминается о чудесном золотом барашке, приносящем славу и богатство. За ним отправились в путь к далекому берегу Геллеспонта (Черного моря) воинственные аргонавты под предводительством Язона. В далекой богатой Колхиде им удалось его добыть, но коварный золотой телец принес неисчислимые беды. Да, погоня за золотом — опасная игра. Но почему же легенда связала его с бараньей шерстью?

Оказывается, в древности был такой способ обогащения золотоносного песка: его промывали на бараньей шкуре. Тяжелые золотины застревали в пушистой шерсти, а песок смывался водой. Очевидно, шкуру с намытым золотом так и продавали заморским гостям наши предки из Колхиды, торговавшие на берегах Черного моря. Сейчас для промывки на шлюзах применяют рифленую резину или хлопчатобумажную ткань с набитыми на нее поперечными рейками.

Шлюз представляет собой длинный наклонный лоток, по которому сверху вниз течет пульпа — смесь руды с водой. Пропустив определенную порцию руды, шлюз промывают сильной струей, получая «сполоск», куда и попадают тяжелые минералы, застрявшие между нарифлениями.

Существуют различные конструкции шлюзов: вибрирующие, как концентрационные столы, движущиеся в виде бесконечной транспортной ленты снизу вверх па-



Промывка золота на бараньей шкуре (по Г. Агриколе)

встречу потоку пульпы. При этом легкая пустая порода стекает вниз, а тяжелые минералы сгружаются с верхнего барабана при перегибе ленты.

Шлюзы чаще всего применяют для улавливания золота из россыпей. Они устанавливаются на плавучих баржах — драгах, которые снабжены ковшовым экскаватором, черпающим золотоносный песок прямо со дна реки или озера. Отработанная пульпа — хвосты обогащения — стекает со шлюза в тот же водоем. На драге остается только золотой концентрат. Такие плавучие обогатительные фабрики работают в Сибири и на Дальнем Востоке на многих реках с весны до осени, пока вода не покроется льдом.

Шлюзы применяются также для улавливания других тяжелых минералов. Часто они используются в качестве контролеров. На них направляется пульпа, отработанная другими обогатительными аппаратами, и шлюзы улавливают тяжелые частицы, случайно проскочившие в хвосты.

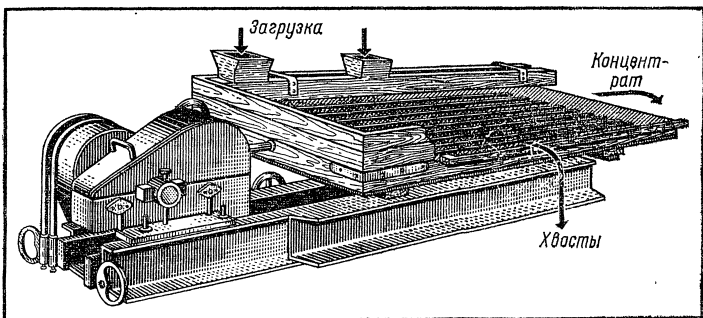
Более производительные гравитационные аппараты,



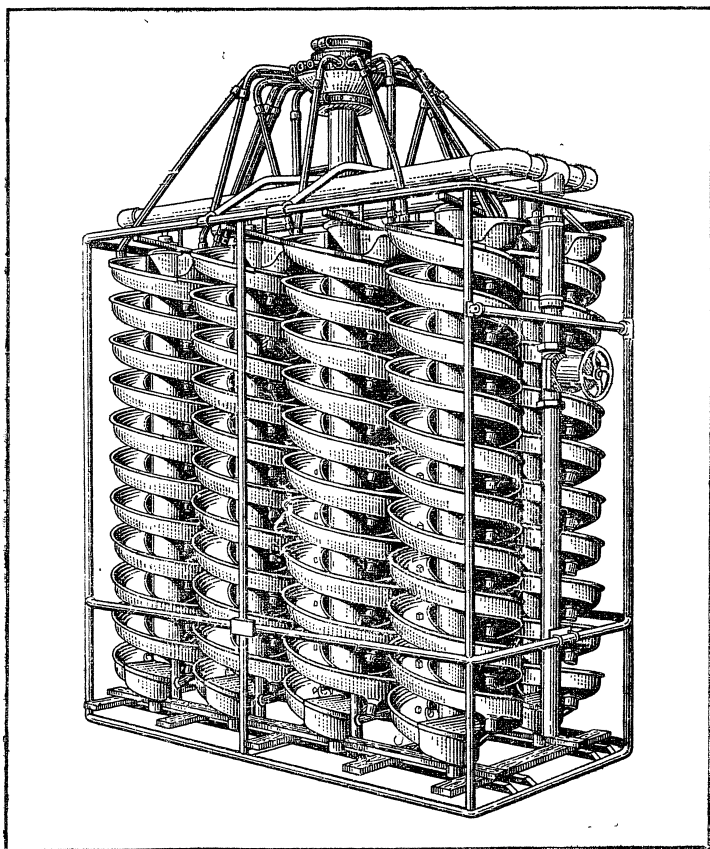
Промывка золота на лотках-шлюзах (по Г. Агриколе)

пригодные для извлечения тяжелых минералов при более высоком их содержании, — концентрационные столы. Они представляют собой наклонные вибрирующие деки с нарифлениями. По деке стекает слой воды с минералами. Частицы, перепрыгивающие рифы под действием вибрации, разгружаются почти напротив места загрузки, а более тяжелые перемещаются вдоль нарифлений и сгружаются с другого конца стола. Эти аппараты применяются для обогащения оловянных, титано-циркониевых, вольфрамовых, а также золотых руд.

Сравнительно недавно появился еще один гравитационный аппарат — винтовой шлюз. Пульпа — смесь воды и руды — стекает по спиральным лоткам. Здесь к силе тяжести добавляется центробежная сила, которая прижимает более тяжелые частицы к внешнему борту, где они попадают в ловушки, отводящие шлик в отдельный приемник. А легкий песок смывается к концу лотка. Через такой аппарат можно пропустить несколько тонн в час золотоносного песка и любой другой россыпи.



Концентрационный стол



Винтовой шлюз



## Золото Сибири и Колымы

В первой половине XIX в. ехал из Иркутска в Якутск купец Шелковников. На стоянке Крестовая он узнал, что охотники-тунгусы покупают порох в фактории, а свинец добывают сами. Оказалось, что в русле р. Тонгуда лежит множество мягких желтых камней, таких же тяжелых, как свинец. Их легко округлить и использовать в качестве пуль. Купец смекнул, что в верховьях реки находится золотая россыпь, и организовал там золотой прииск.

Вскоре выяснилось, что на сибирских реках имеются золотые россыпи. По старинной эскимосской легенде, на Чукотке стоял Золотой Великан, такой высокий, что закрывал головой Луну. Луна пожаловалась Хозяину пурги. Тот устроил невиданную пургу, которая свалила Великана. Ноги его оказались на Аляске, туловище упало на Чукотку и Колыму, а голова в Забайкалье. По другой версии, Великан разлетелся в обратном направлении: головой на Аляску, а ногами в Забайкалье; при этом у него еще оказался хвост, попавший на Лену.

Купцы и старатели начали осваивать сибирское золото еще в конце прошлого века. Их суровый быт блестяще описан Вячеславом Шишковым в его книге «Угрюм-река».

В 1908 г. геолог Юрий Розенфельд, посланец купца Шустова, увидел на берегу одной из рек Колымского края мощные кварцевые жилы. Опробовал наносы и обнаружил признаки золота. Сами жилы Розенфельд не разрабатывал: не было оборудования. Он рассчитывал сделать это в следующем году. Но попасть на Колыму смог только через шесть лет. С ним шел старатель Сафи Шафигулин, по прозвищу Бориска. Он и нашел первое золото на Колыме. В его честь один из приисков был позже назван «Борискин».

Освоение Колымы началось после Октябрьской революции. В начале 20-х годов на Колыму и Чукотку было послано несколько крупных геологических партий. Руководил ими Ю. А. Билибин. В 1928—1929 гг. экспедиция Билибина обнаружила золотоносные россыпи. В 30-х годах были открыты месторождения олова, вольфрама, построены горнодобывающие комбинаты в Певеке и Иультине. Энергетическими центрами края стали Аркагалинская ГРЭС, работающая на местных углях, Магаданская

ТЭЦ, Билибинская и Певекская теплоцентрали. Выросли поселки, города.

Суров и неприютен этот край. Короткое прохладное лето, дождливая весна и осень, дожди попеременно со снегом. Зимняя пурга способна срывать железные крыши с домов, гонять по воздуху выхваченные из штабеля доски. Первые поселенцы ютились в землянках, тяжело страдали от холода, голода и цинги.

Но разворачивались, оборудовались, росли, как грибы, золотые прииски со странными названиями: «Фролыч», «Незаметный», «Комсомолец» на реке Чай-Урье; «Шайтан», «Безалаберный», «Геологический», «Эх-бы». В этих названиях смесь эпох и судеб, удач и превратностей старательского дела.

Вслед за экспедицией Ю. А. Билибина, доказавшей перспективность Колымского региона, в конце 30-х годов сюда приехали молодые геологи искать предсказанные учеными месторождения.

Трудное колымское золото было необходимо стране. В годы войны дальневосточные прииски объехал тогдашний вице-президент США Уоллес с целью прощупать платежеспособность Советского Союза по ленд-лизу. Пересыпая с ладони на ладонь золотоносный шлик, он говорил: «Да, это Клондайк!» Но он ошибался. Давно превратился в мертвый город Доусон: как только кончилось золото и золотая лихорадка, город опустел. Та же участь предрекалась и Магадану. Об этом писала «Нью-Йорк таймс» еще в июле 1939 г., когда поселок Магадан был преобразован в город.

В конце 50-х годов действительно стали беднеть и закрываться некоторые прииски.

Но геологическая разведка открыла новые запасы. Сейчас Магадан превратился в большой современный город и порт; через него идет поток грузов на Колыму, Чукотку, в Якутию. В Магаданском НИИ разрабатываются новые процессы и аппараты для переработки руд золота, вольфрама, олова и других полезных ископаемых, имеющих на Дальнем Востоке.

## Цена чистоты, постоянства и твердости

Есть тонкие властительные связи  
Меж контуром и запахом цветка.  
Так бриллиант не виден нам, пока  
Под гранями не оживет в алмазе.

*В. Брюсов*

### Три ипостаси углерода

Минералы самородного углерода столь различны и непохожи друг на друга, что непосвященному никогда в голову не придет заподозрить их в кровном родстве. Тем не менее алмаз и графит состоят из почти чистого углерода, а уголь — на 90%. Уголь имеет органическое происхождение, но его роль как твердого полезного ископаемого очень велика, и он обогащается теми же методами, что и другие виды минерального сырья.

Графит состоит из тонких непрозрачных чешуек черного цвета, минерал этот до того мягкий и податливый, что его применяют в качестве смазки и в грифелях карандашей. Алмаз — самый твердый, прозрачный и сверкающий кристалл. Оба эти минерала существуют в природе, не проявляя сколько-нибудь заметной склонности переходить один в другой. Чтобы алмаз перешел в графит, его нужно нагреть до 1500 К без доступа воздуха. Обратный переход требует еще более жестких условий: температура не ниже 1500 К, давление выше 4,5 ГПа (45000 атм), среда — расплавленный металл и присутствие катализаторов. Свыше 200 лет люди пытались синтезировать алмаз из графита. В 1939 г. молодой советский физик (ему не было и 30 лет) О. П. Лейпунский опубликовал вычисленную кривую равновесия и условия перехода графита в алмаз. Но открытие Лейпунского было зарегистрировано только в 1971 г. К этому времени синтетические алмазы были получены в Швеции (1953 г., Э. Лундблад), США (1954 г., Г. Холл) и СССР (1960 г., Л. Ф. Верещагин).

Сравнительно недавно Б. Дерягин и Д. Федосеев показали, что алмаз можно синтезировать, сжигая углеводороды и конденсируя образующийся углерод на холодной поверхности. Это объясняет открытие астрофизиков, которые, изучая аномальное рассеяние света, доказали присутствие алмазов в межзвездной пыли. Оказалось, что алмазы в виде микроскопических кристалликов при-

существуют в резине, при производстве которой получают сажу, сжигая углеводороды в плазмотронах. Исследуя кинетику этого процесса, ученые показали, что из плазмотрона вылетают алмазы, которые, сгорая, образуют сажу. Только ничтожная часть их — песколько каратов на автопокрышку — успевает охладиться и попасть в резину. Техногенный парадокс лег в основу изобретения способа напыления алмазного покрытия на металл. Толщина такого покрытия — около десятка атомов углерода, но твердость его — алмаз.

В недрах Земли подходящие условия для синтеза алмазов из углерода имеются в магме, представляющей собой расплав при высоких значениях температуры и давления на глубине свыше 80 км. Магматическая порода прорывается к поверхности Земли по трубкам взрыва. По названию первого алмазного рудника Кимберли в Южной Африке, открытого в 1871 г., трубки были названы кимберлитовыми; это название увековечило имя тогдашнего министра колоний Англии, совсем неповинного в этом величайшем геологическом открытии.

Для ученых-геологов алмаз — не только ценнейшее полезное ископаемое. По словам Н. В. Соболева, он прямой свидетель и участник процессов, происходящих в верхней мантии Земли, а кимберлитовые трубки — это окна в недра. Процессы выветривания разносят алмазы из кимберлитовых трубок по поверхности Земли, образуя россыпные месторождения. До открытия рудника Кимберли алмазы добывали только из россыпей, поскольку жерла трубок в основном засыпаны наслоениями земли и песка. Теперь, зная источник алмазов, геологи ищут эти трубки по направлениям повышения концентрации алмазов в шлихах (так же ищут и коренные месторождения золота, олова, вольфрама и др.). Недавно таким способом была сделана грандиозная находка в пустыне Калахари (Южная Африка). Сказочно богатая трубка с высоким содержанием ювелирных алмазов была открыта под 40-метровым слоем песка.

### Твердость и постоянство

Название алмаза происходит от греческого «адамас», что означает непреклонный, несокрушимый, или арабского «ал-мас» — твердейший. В этом качестве алмаз стал выступать всего полвека назад. До того времени твердость алмазов не использовалась в промышленности,

и он, как и золото, ценился за блеск и постоянство, как «драгоценность, известная лишь королям», по словам древнеримского ученого Плиния.

Крупные кристаллы алмаза массой более 50 карат (10 грамм) настолько редки в природе, что им присваиваются собственные имена, их биографии богаты кровавыми преступлениями и драматическими событиями. Самый крупный — «Куллинан» весил 3106 карат, он был найден в Южной Африке.

Но первые алмазные копи появились в Индии. В 1983 г. при сооружении оросительного канала на севере страны близ г. Анантнага рабочие нашли статуэтку бога Рамы, украшенную алмазами и другими самоцветами стоимостью более 1 млн рупий. Археологи датировали находку XIV веком. Промышленные разработки алмазных копей относятся к XVIII в., хотя известно, что алмазы находили в Индии более 4 тыс. лет назад.

До XV в. алмаз ценился меньше, чем цветные драгоценные камни. Древние греки и римляне почти не знали алмаза, а на Востоке его ставили ниже рубина, жемчуга, изумруда, сапфира, лазурита и даже хризолита. Необработанный алмаз редко выглядит привлекательным: блеск и дисперсия света проявляются только у идеально гладких кристаллов правильной формы. В древней Индии было известно, что шлифовка усиливает блеск: индийская огранка заключалась в подшлифовке естественных граней. Только когда были открыты способ шлифовки алмазов алмазным порошком и секрет наиболее удачной огранки, появилась возможность раскрыть блеск и красоту этого камня, который стал королем минералов. Его классическая огранка требует нанесения 56, а для крупных — до 76 граней.

К 1980 г. добыто более 1300 млн карат (260 т) алмазов, в том числе 365 млн карат ювелирных. Половина этого количества добыта с 1960 по 1980 г. Большая часть добытых алмазов имеет техническое значение, они незаменимы в современной индустрии. Обработка твердых металлов, точное приборостроение, буровые работы и многие другие отрасли промышленности немыслимы сейчас без применения алмазов. Алмазом массой в 1 карат можно изготовить три тысячи часовых камней, или пробурить скважину двухметровой глубины в самых твердых горных породах, или распилить 10 тыс. кубических сантиметров кварца, или нарезать миллион квадратных метров оконного стекла. Принято считать, что для про-

мышленно развитых стран на каждую 1000 т выплавленной стали должно приходиться не менее 1000 карат алмазов.

Спрос на алмазы с каждым годом возрастает, растет и их добыча. Накауне второй мировой войны было продано 5 млн карат промышленных алмазов, сейчас в мире производятся десятки миллионов карат, т. е. многие тонны алмазного порошка, стоимость которых превышает 100 млн долларов. Вот почему теперь объектом спекуляции и ажиотажа становятся не только редкие крупные камни, за которыми охотились еще полвека назад, но и алмазные россыпи и копи, где добывается даже алмазная пыль.

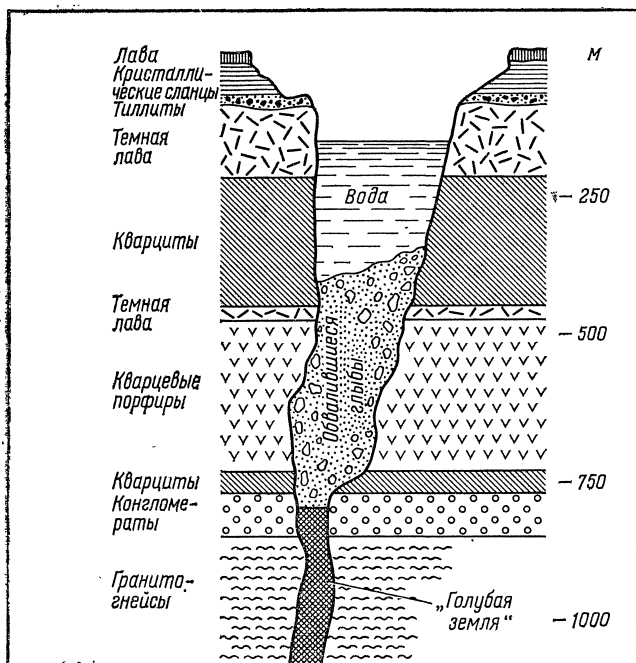
Запасы алмазного сырья весьма ограничены и быстро тают. Сейчас они примерно в 30 раз превышают нынешний ежегодный объем добычи. Основные районы разработки алмазов в капиталистическом мире — это Африканский континент, Бразилия, Индия, и в меньшей степени Венесуэла, Гайана.

В нашей стране известно месторождение алмазов в Якутии.

Все большую роль в технике приобретают искусственные алмазы. Однако условия их синтеза — сочетание высоких значений давления и температуры — делают их достаточно дорогими; природные мелкие алмазы обходятся дешевле. Кроме того, в алмазных коях время от времени попадаются и крупные кристаллы, которые пока не удается вырастить искусственно.

Среднее содержание алмазов в породе — около 0,5 карат на 1 м<sup>3</sup> пустой породы; рентабельно перерабатывать и руды с содержанием 0,2 карата. Это значит, что ежегодно в мире для извлечения алмазов добывается и перерабатывается свыше 70 млн м<sup>3</sup> алмазной руды. Это пирамида высотой около 6 км. Вся эта гора дробится, измельчается и просеивается сквозь сита или промывается водой. На ситах остается алмазосодержащий шлик.

Самая огромная и пользующаяся наиболее дурной славой трубка рудника Кимберли разрабатывалась с 1871 по 1908 г. вручную, без всякой механизации. Там возникла самая большая яма, вырытая руками людей в теле Земли: 460 м в поперечнике и 1070 м глубиной. В ней добыто 14,5 млн карат алмазов (2,9 т). Сейчас она наполовину заполнена водой, и на рудниках приступили к подземной разработке. С этой целью вблизи трубки строят вертикальную шахту, а затем по горизонталь-



«Большая яма» Кимберли в разрезе

ным горным выработкам — квершлагам — извлекают алмазосодержащую породу.

После отмывки основной части породы оставшуюся тяжелую фракцию — шлик — раньше разбирали вручную. Сейчас это делается с помощью различных обогащательных аппаратов и сортировочных автоматов. Для крупнозернистых шликсов применяют гравитационные методы обогащения, как и для золота, хотя разница в плотности здесь минимальна. Плотность алмаза  $3,47-4,55 \text{ г/см}^3$ , а пустой породы — кварца, кальцита и др. —  $2,65$ . Магнитные минералы, если они есть в руде, отделяют с помощью магнитной сепарации.

Однако наиболее эффективный метод обогащения для крупных алмазов — рентгенолюминесцентная сепарация. При облучении рентгеновскими лучами кристаллики алмаза вспыхивают ярким блеском, который регистрируется фотозаписью, и пробу, содержащую вспыхнувший кристалл, автомат сбрасывает с транспортера в отдель-

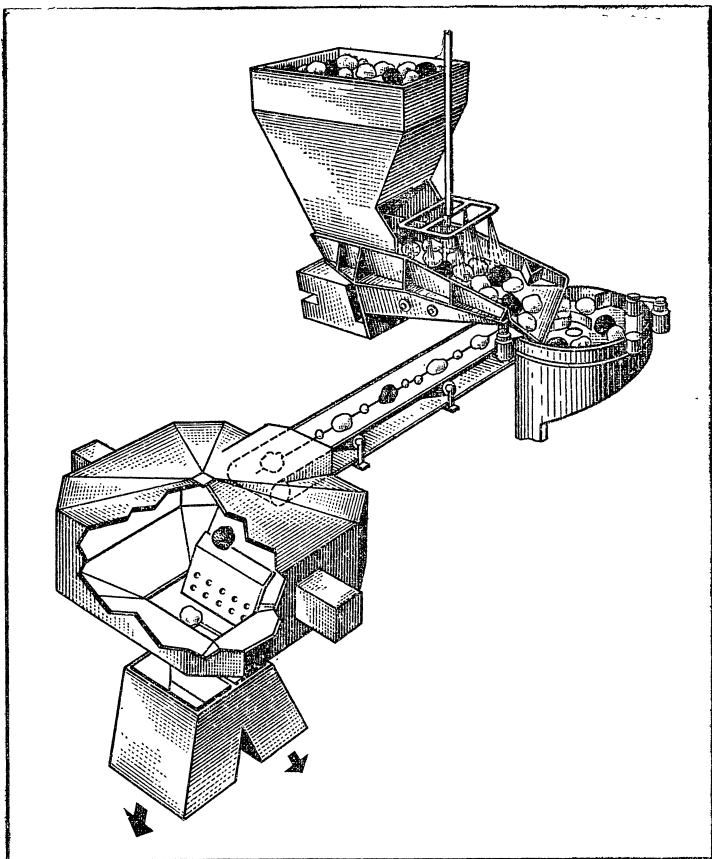


Схема работы люминесцентного сепаратора

ный продукт. За разработку и внедрение рентгенолюминесцентной сепарации на обогатительных фабриках Якутии группе ученых, конструкторов и технологов в 1986 г. присуждена Государственная премия СССР.

Еще один способ, применяемый для извлечения более мелких алмазов, основан на гидрофобности этого минерала, т. е. способности не смачиваться водой и прилипать к жиру. Водную суспензию пропускают через виброслои, поверхность которых покрыта толстым слоем жира: алмазы застревают в жире, а остальные минералы смываются водой.



## Блеск и нищета алмазной империи

Нелегко путь извлечения алмазов из земных недр, потом из добытой породы. Нелегко и труд гранильщиков, шлифующих самый твердый на земле минерал. Конечно, этот гигантский труд оправдан не только красотой бриллиантов и полезностью алмазов. Стоимость этих камней такова, что они имеют гораздо большее значение: это сконцентрированные символы богатства и власти, а значит, потенциальный источник благ и бедствий отдельных личностей и целых народов.

В древние времена великолепный алмаз вызывал зависть и вражду деспотических правителей, что повергало целые страны в ужасы кровавых войн.

Знаменитый Кох-и-Нор был найден в копиях Голконды (Южная Индия) и весил после огранки 186 карат. По преданию, камень попал в руки основателя династии Великих Моголов, затем достался по наследству Шах-Джехану и украшал его Павлиний трон. Персидский шах Надир захватил в Индии вместе с огромной добычей этот камень и отвез его в Исфаган. Надир был убит в 1747 г., его империя распалась, а камень достался основателю династии Дуррани афганцу Ахмед-Шаху. Его сын Тимур в 1773 г. перенес столицу и сокровища в Кабул. После смерти Тимура в 1793 г. наступил долгий период смуты, вызванный борьбой за власть 23 его сыновей. В конце концов драгоценности достались сингху Раджиту Сингху. Началась борьба между ним и его братьями, один из которых, спасаясь от преследований, в 1813 г. бежал, захватив с собой драгоценности, и в конце концов купил себе на них у Раджита Сингха жизнь и убежище. В 1849 г. Кох-и-Нор перешел во владение Ост-Индской компании, которая подарила его английской королеве Виктории. В 1852 г. камень был перегранен, уменьшившись до 108,9 карат. Королева носила его в качестве броши, а затем он был укреплен в центре креста государственной короны.

Крупные алмазы уникальны, каждый из них имеет свое имя и историю, поскольку становится объектом борьбы, и его путь по странам мира отмечен следами крови, которые оставили после себя заговорщики или грабители.

Знаменитый «Регент» массой в 140 карат был найден в 1701 г. индусом-невольником в копиях на р. Кистна. Ему удалось бежать, спрятав камень под повязкой на

голове, выдавая себя за раненого, и через несколько месяцев он поверил свою тайну приятелю-матросу. Матрос убил простодушного индуса, похитил алмаз и продал его за тысячу фунтов стерлингов английскому губернатору Мадраса Томасу Питту. Питт приказал отшлифовать камень и перепродал его — уже за несколько миллионов — герцогу Орлеанскому, тогдашнему регенту Франции. В 1792 г. камень был украден, но затем подброшен ворам обратно. Уже в 1799 г. первый консул республики Наполеон получил под залог «Регента» крупный заем, который позволил ему обеспечить оружием свои завоевательские походы. Затем он выкупил камень и украсил им эфес своей шпаги. Империя, шпага, а вместе с ними и «Регент» были безвозвратно утеряны при Ватерлоо. Алмаз попал в Пруссию и только значительно позже вернулся в Париж, на этот раз в музей Лувр. В 1940 г. во время вторжения гитлеровцев в Париж его спрятали за панелью камина в замке Шамбор. После войны он снова вернулся в Лувр.

Алмазы не только доставались ценой крови. Ими расплачивались за кровь. Один из старейших алмазов — желтый продолговатый «Шах» (88,7 карат), когда-то украшавший трон Великих Моголов, был подарен персидским правительством русскому императору в виде компенсации за убийство А. С. Грибоедова — русского посла в Тегеране.

Добыча алмазов в Южной Африке началась 120 лет назад, в 1867 г. Одни рассказывают про мальчика-пастуха, который играл на берегу р. Оранжевой ослепительно ярким «камешком» и был замечен за этим занятием фермером-поселенцем, а тот признал в камешке неотшлифованный алмаз. Другие ссылаются на встречу европейцев с местным знахарем, который вынул блестящий камень из стены своей глинобитной хижины и пользовался им для исцеления своих соплеменников. Впоследствии этот алмаз под названием «Звезда Южной Африки» был продан в Лондоне за 25 тыс. фунтов стерлингов. Уже через год после находки гриквалендская территория была разделена на крохотные, в 10 квадратных метров, участки, на которых ковырялись подозревающие всех и вся, обезумевшие от жажды наживы искатели алмазов.

В 1870 г., когда алмазная лихорадка была в разгаре, в южноафриканской провинции появился английский делец и авантюрист Сесиль Родс. Родс, а вслед за ним Опенгеймер навели «порядок» на алмазных коях. Дело

было поставлено на широкую ногу. Из разных районов африканского континента один за другим прибывали транспорты с «живым товаром» — рабами, которых загоняли в карьеры и шахты и которые практически не уходили оттуда живыми. Одни погибали под обвалами, других настигала пуля надсмотрщика.

Последствия находки первого алмаза в Южной Африке поистине трагичны. По существу эта находка явилась причиной англо-бурской войны, спровоцированной английским империализмом, чтобы прибрать к рукам колоссальные богатства страны. Земли африканского народа гриква с месторождениями алмазов, оцениваемые ныне в 90 млн фунтов стерлингов, были обманом отторгнуты Сесилем Родсом. Благодаря открытию алмазов, а впоследствии золота и урана Южная Африка из отсталой сельскохозяйственной страны превратилась в самое крупное индустриальное государство на Африканском континенте.

Система беспощадного подавления и эксплуатации негритянского населения нашла ныне свое логическое завершение в «теории» и практике апартеида.

Алмазная промышленность являет собой один из наиболее ярких примеров концентрации капитала. Ушел в прошлое недолгий период «алмазной лихорадки», когда тысячи старателей и авантюристов, хлынувших в Южную Африку, промывали в примитивных ситах аллювиальные почвы р. Вааль и разрешали любой спор выстрелом из пистолета. Их сменили «киты», которым под силу было наладить в широких масштабах геологическую разведку, построить дороги, завести квалифицированную рабочую силу и совершенное оборудование и с их помощью проникнуть на несколько километров внутрь Земли.

С 1888 г., когда Сесиль Родс создал свой гигантский алмазный трест, производство и сбыт алмазов полностью сосредоточились в его руках. Наследники Родса — семья Оппенгеймеров, тесно связанная с финансовой империей Ротшильдов, пайщики Оппенгеймера — банкирский дом США «Диллон Рид энд компани», американский миллионер Чарльз Энгельхард, магнаты лондонского Сити. По сравнению с гигантской алмазной империей даже владения Родса кажутся жалкой делянкой. Контуры этой империи не обозначены ни на одной географической карте, но ее владельцы собирают дань не только с Южной Африки, но и с Конго, Сьерра-Леоне, Замбии, Анголы, Танзании. Входит в нее и Зимбабве (бывшая Ро-

дезия, название которой унаследовано от имени Родса). Империя Оппенгеймера — это группа гигантских компаний-концернов, среди которых выделяются «Де Бирс консолидейтед» и «Консолидейтед даймонд майнз оф Саут-Уэст Африка».

Они добывают около 45% всех алмазов в мире, идущих на изготовление ювелирных изделий. С помощью связей с владельцами других алмазных компаний и благодаря своему влиянию в Лондонской центральной организации по сбыту алмазов — промышленных или драгоценностей — Оппенгеймер контролирует фактически 85% добычи и сбыта алмазов в капиталистическом мире. Оппенгеймеры давно перешагнули границы одного лишь алмазного бизнеса, занявшись производством взрывчатки, химических удобрений. Но алмазы для них по-прежнему главный источник прибылей.

На старых разработках в Кимберли и на новых — у Берега Скелетов время остановилось. Те же надсмотрщики, те же катастрофы, тот же тяжелый подневольный труд. Условия труда рабочих и их жизненный уровень не только не улучшились со времен зарождения добычи алмазов, но даже ухудшились. Для африканских шахтеров алмаз воплощает в себе не «богатство, величие, постоянство и чистоту», как говорится в рекламе компании, а грязные перенаселенные бараки — компаунды, окруженные высокими стенами и охраняемые надсмотрщиками, унижительные процедуры проверки после окончания смены, отрыв от семей, грязные шахты, избиение и издевательства. Долгими часами копаются они в голубой глине. Смертность от туберкулеза здесь в 30 раз выше, чем среди европейского населения Южной Африки, средняя заработная плата — ниже в 12 раз. Митинги запрещены. Организация профсоюзов объявлена незаконной. Рабочих набирают из возможно большего числа племен — их импортируют из Лесото, Ботсваны, Малави и других африканских стран, — чтобы они, чего доброго, не выступили единым фронтом против своих хозяев.

Такова цена случайно найденного самородка.

Все прогрессивное человечество протестует против грязной системы апартеида в Южно-Африканской Республике. Бойкот в торговой и дипломатической сферах, культурном обмене, организацию экономических санкций против расистов Претории не поддерживают только самые реакционные правительства в мире, в том числе США. Летом 1986 г. руководитель аппарата сотрудни-

ков Белого дома заявил, что санкции не нужны, поскольку американские женщины не захотят отказаться от покупки южноафриканских бриллиантов.

Вопиющее по цинизму высказывание ближайшего сотрудника президента США вызвало взрыв возмущения в стране. Он отшучивался, пытаясь выдать себя за новоявленного д'Артаньяна, пекущегося о благе и престиже женщин. В отличие от благородного героя Дюма, который вернул алмазные подвески королеве, а вместе с ними и ее честь, Белый дом руководствовался отнюдь не рыцарскими побуждениями. Он пытался защитить американские транснациональные корпорации, паживающиеся на жестокой эксплуатации южноафриканского народа.

Видный политический и общественный деятель США Джесси Джексон заявил: «Никакие бриллианты не могут блистать, когда они покрыты кровью». В ответ президент Р. Рейган сказал: «В стратегическом плане ЮАР — один из самых важных районов мира. Это хранилище многих чрезвычайно важных полезных ископаемых: ванадия, марганца, хрома, платины, и у Запада нет другого надежного источника их получения». Что касается алмазов, то потребность в них США удовлетворяют исключительно за счет импорта из ЮАР. Причем прежде всего драгоценный минерал используется военно-промышленным комплексом США, в частности аэрокосмической промышленностью.

### Алмазный фонд СССР

— Товарищ Урицкий, я тут брульянты принес. На обыске взяли!

— Оставьте,— сказал В. С. Урицкий.

— Мне портянка нужна, я ее с ноги снял.

Урицкий оглядел комнату, увидел солдатский котелок.

— Вот,— сказал он.— Высыпьте.

Солдат развязал узел — и оттуда брызнули ослепительные огни. Тут были аметисты, рубины, изумруды, но больше всего бриллиантов. Урицкий стоя неотрывно смотрел, но не на блеск холодных камней, а на заросшее щетиной лицо солдата. Когда солдат ушел, он сказал:

— А ведь портянки-то лишней у него нет.

...Наутро бриллианты были сданы в государственный фонд, за счет которого в 1921 г. закупался хлеб для голодающих Поволжья.

Так описала Е. Я. Драбкина в историко-мемуарной

повести «Черные сухари» начало формирования Алмазного фонда СССР.

В России первый алмаз был найден на Урале в 1829 г. на Крестовоздвиженском золотом прииске 14-летним мальчиком Павлом Поповым. Алмазные россыпи были обнаружены на реках Чусовой, Вишере, Шугоре. Но только в 60-х годах нашего века геологи Вишерской экспедиции отыскиали там, наконец, коренные месторождения.

До открытия Якутских трубок Алмазный фонд СССР состоял в основном из ипоземных редкостей. Так, «Орлов» в 190 карат был куплен в подарок Екатерине II ее фаворитом за 450 тыс. рублей плюс ежегодная рента амстердамскому купцу 4,5 тыс. руб. серебром. Там же хранится и «Шах» (88,7 карат).

Возможность нахождения алмазопосных кимберлитов в Сибири была предсказана еще в 1940 г. В. С. Соболевым на основании сопоставления геологического строения платформ Сибири и Южной Африки. В послевоенные годы здесь была организована разведка на алмазы под руководством М. М. Одинцова, и в 1949 г. в бассейне р. Вилюй в Якутии были открыты аллювиальные месторождения. Через 5 лет молодой минералог Л. А. Попугаева по сопутствующим алмазу пиропам нашла первую кимберлитовую трубку. Впоследствии были обнаружены другие трубки и на одной из них — «Мир» — начались разработки.

Здесь построен город Мирный, обогатительные фабрики, возникли новые поселки: Удачный, Айхал (в переводе с якутского — «слава»). Первый десант из Мирного добрался сюда в январе 1961 г. Первопроходцы жили сначала в палатках, потом построили деревянные дома. Уже в августе удалось добыть первые алмазы. Весной 1985 г. здесь был найден изящный кристалл в форме октаэдра массой 291,6 карат. Он был назван «40 лет Победы» и стал вторым по величине среди алмазов Якутии. Первый массой 332 карата по имени «XXVI съезд КПСС» извлечен из трубки «Мир». Эти алмазы были переданы в Алмазный фонд СССР.

Крупные камни попадаются не так уж часто. Зато технические алмазы Якутии полностью обеспечили независимость нашей страны от Де Бирс и других западных монополий.

Интенсивные исследования ведутся и в направлении синтеза искусственных алмазов. В Институте сверхтвер-

дых материалов АН УССР вслед за синтетическими алмазами создан «киборит» на основе кубического нитрида бора. Это искусственный режущий материал, соперничающий в твердости с алмазом.

В Физическом институте Академии наук СССР (ФИАН) синтезированы кристаллы, очень похожие на алмаз. Это фианиты, которые представляют собой кристаллы, выращенные из расплава окислов циркония и гафния при температуре около  $3000^{\circ}\text{C}$ . В процессе выращивания в расплав добавляют примеси-стабилизаторы, которыми можно окрашивать бесцветные кристаллы в разнообразные цвета, имитируя не только алмаз, но и другие драгоценные камни — сапфир, топаз, аквамарин, гранат. Авторы изобретения — В. В. Осико, В. И. Александров, В. М. Татарипцев, удостоенные в 1980 г. Ленинской премии, вовсе не ставили перед собой целью получение ювелирных камней. Фианиты предназначались для производства оптических линз и окон, способных работать при высоких температурах, конструкционных и лазерных материалов. Первоначально считалось, что фианиты не имеют природных аналогов. Однако вскоре в породах Тажеранского массива на берегу Байкала был найден природный аналог фианита — оранжево-красный тажеранит.

Соревнование человека с природой продолжается.

## Горючий камень

Чтобы спасти Советскую власть сейчас, необходимо дать хлеб для промышленности, т. е. уголь. Без этого нельзя восстановить хозяйство.

*В. И. Ленин (Соч. Т. 40. С. 298).*

## Деревянный минерал

Несколько сот миллионов лет назад зона тропического климата на Земле доходила до широт Шпицбергена и выше. Тепло и высокая влажность способствовали буйному росту растений, в том числе громадных деревьев. В связи с отсутствием в этот период (названный впоследствии геологами карбоновым, или каменноугольным) лесной и целлюлозно-бумажной промышленности деревья умирали, падали и на их остовах вырастали новые деревья. Так было много раз, пока геологические сдвиги и

# Свойства каустобиолитов

Ряд углефикации	Химический состав, %				Плотность, г/см <sup>3</sup>	Теплотворная способность, кал/г
	C	O	H	P+S		
Сухое дерево	50	43	6	—	0,8	700
Торф	55—65	33	6	—	1,0	1500—2000
Бурый уголь	65—80	19	6	1	1,2	2000—7000
Каменный уголь	80—93	10	5	1	1,3	7000—8500
Антрацит	93—98	2	3	—	1,5	8500—9000
Графит	100	0	0	—	2,2	Не горит

осадочные породы не погребали многометровые толщи остатков растений под слоем горных пород. Так под действием высокой температуры и огромного давления, без доступа кислорода происходила углефикация растительного материала, его обескислороживание и обеднение водородом. По мере протекания этого процесса исчезали узнаваемые детали строения исходных растений, заметные еще в торфе, буром угле и немного в каменном, и образовывался сплошной антрацит, а затем и кристаллический графит; последний на 100% состоит из углерода (см. таблицу). Угли (каустобиолиты), как и другие породы органического происхождения—янтарь, жемчуг, ракушечник, перламутр, не строго попадают под определение «минерал», находясь где-то вблизи условной границы, разделяющей органический и неорганический миры. Условность этой границы подтверждается тем, что графит может быть и органического, и неорганического происхождения.

В начале палеозойской эры (древней жизни), когда растительный мир был значительно беднее, из органических останков образовывались горючие сланцы, например эстонское месторождение Кохтла-Ярве. В палеозойскую эру, включающую каменноугольный период, образовалось 40% месторождений угля. В следующую, более сухую мезозойскую эру — всего 5%. 55% углей образовалось в первые периоды нашей кайнозойской эры. Последний, четвертичный период кайнозойской эры, соответствующий возрасту человечества — 2 млн лет, оставил нам только торфы и частично бурые угли.

Геологи и палеонтологи изучают каменноугольные пласты и по отпечаткам древних растений и животных



раскрывают генезис (происхождение) тех или иных пластов, а также историю развития жизни на Земле.

Начало использования угля относится только к XII в. нашей эры (Китай). В Европе уголь также упоминается в документах XII в. Но, поскольку при сжигании угля образуется сернистый газ, запах которого ассоциировался с адским пламенем, сжигание угля в средние века было запрещено. Только в конце XVIII в. уголь стал применяться в промышленности.

## На-гора

С развитием производства в XIX в. уголь стал основным источником энергии в промышленности и на транспорте, а кокс использовался как восстановитель железа при доменной плавке.

Огромные запасы угля — сотни миллиардов тонн — позволяют до настоящего времени наращивать его добычу. Сейчас она составляет только в нашей стране около 800 млн т в год. Несмотря на все возрастающую роль нефти, газа, атомной и гидроэнергетики, уголь еще долгое время останется одним из важнейших видов минерального сырья. Его добыча в нашей стране с 1940 г. возросла в 5 раз.

Как правило, угольные пласты залегают неглубоко от поверхности. Поэтому уголь добывается преимущественно открытым способом. С поверхности угольного пласта снимается порода, и уголь черпается из карьера в вагоны прямо ковшем экскаватора. Это самый дешевый и производительный способ добычи угля. В нашей стране таким образом разрабатываются угли в Экибастузе, на Канско-Ачинском топливно-энергетическом комплексе (КАТЭК), частично в Кузбассе и на других месторождениях.

На десятки километров раскинулось крупнейшее месторождение угля — Экибастузское — в Казахстане. На его базе создается энергетический комплекс, в который войдут пять ГРЭС суммарной мощностью 20 млн кВт электроэнергии. Уже шагнули в степь опоры самой большой линии электропередачи постоянного тока напряжением 1500 кВ. Протяженность сверхдальней ЛЭП будет 2415 километров. Электромост перешагнул на своем пути сотни рек, горы Урала; мачты-гиганты высотой 42 м понесли ток Экибастуза в центральную часть России. Экибастузские ГРЭС уже дают промышленный ток.

Угольщики Экибастуза питают топливом 20 электро-

станций Казахстана, Урала и Сибири. Ежегодно они отгружают более 70 млн т дешевого угля. Строительство разреза «Богатырь» было начато в 1975 г. А сейчас там каждую минуту добывают более 100 т угля, 54 млн т в год поднимают на-гора. В разрезе «Богатырь» работает современная техника: роторные экскаваторы производительностью от 2 тыс. до 5 тыс. т угля в час. Близок день, когда угольщики Экибастуза добудут миллиардную тонну со дня разработки месторождения.

Горняки Экибастуза были первыми, кому пришлось осваивать эту мощную технику.

Сейчас набирает силу КАТЭК — здесь добывается 50 млн т угля в год. Мощность угольного разреза такова, что в перспективе возможно добывать до 1 млрд т/год самого доступного, дешевого и малосернистого угля. Правда, он обладает высокой зольностью и перевозки его нецелесообразны: он должен перерабатываться на месте.

В Донецком, Воркутинском бассейнах и некоторых других уголь добывается подземным способом. Шахты уходят в глубь Земли на километр и более. Здесь применяются автоматизированные проходческие комплексы, включающие угольные комбайны, которые врубаются в угольный пласт, собирают и грузят уголь в вагонетки. Несмотря на это, производительность труда на шахтах втрое меньше, чем на карьерах. Поэтому сейчас все шире внедряется метод гидродобычи, при котором уголь размывается гидромониторами и в виде суспензии по трубам подается на поверхность. Здесь происходит обогащение и переработка угля.

### Урожай гравитационного поля

Пласты угля в Земле в значительной степени перемешаны со сланцевыми, глинистыми и другими породами. Кроме того, в процессе добычи в уголь попадает порода из оконтуривающих угольный пласт слоев — лежачего и висячего боков. Эти бесполезные примеси целесообразно удалить до попадания угля в топку, да и перевозить их нет смысла. Эта так называемая внешняя зольность может быть отделена методами обогащения полезных ископаемых в отличие от внутренней зольности, связанной с самим угольным веществом аналогично золе, остающейся после сгорания древесины.

Плотность угля составляет 1,2–1,35 г/см<sup>3</sup>, а вмещающих горных пород — 1,8–2. На этом различии основано

их разделение в гравитационном поле. Разница в плотности здесь значительно меньше, чем у золота и вмещающих пород, поэтому и гравитационные аппараты для обогащения углей более сложны. Существует множество механических способов разделения минералов по плотности, объединяемых названием «гравитационное обогащение полезных ископаемых». В качестве среды гравитационного поля используются вода, воздух, тяжелые жидкости, суспензии, жидкий электролит, помещенный в скрещенные электрическое и магнитное поля. Среда характеризуется реологическими параметрами: плотностью, вязкостью, предельным сопротивлением сдвигу, устойчивостью и др. Свойства среды оказывают влияние на скорость перемещения разделяемых частиц и эффективность разделения.

Условно минералы делят на три группы: легкие (до  $3 \text{ г/см}^3$ ), куда входит и уголь, средние ( $3-4 \text{ г/см}^3$ ) и тяжелые (более  $4 \text{ г/см}^3$ ). Плотность минералов зависит от химического состава и типа кристаллической структуры. В последнюю группу входят, как правило, минералы, содержащие тяжелые металлы. Наибольшая плотность у самородных элементов — золота, серебра и минералов группы платины.

По закону Архимеда на всякое тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной этим телом жидкости. Но минералов легче воды не существует. Известны некоторые растворы и жидкости с высокой плотностью, например хлорэтан ( $1,58$ ), бромформ ( $2,9$ ), тетрабромэтан ( $3$ ), ртуть ( $13,6$ ). Но применение этих жидкостей в больших масштабах обходится дорого. Есть другой способ создания тяжелой среды для разделения минералов — получение суспензий.

Тонкоизмельченный порошок какого-либо тяжелого вещества, например ферросилиция, минералов галенита, магнетита, пирита или барита, размешивают в воде. При достаточной степени измельчения порошок оседает не сразу, а долгое время находится во взвешенном состоянии. Взвесь тем устойчивее, чем больше тонких частиц находится в ней.

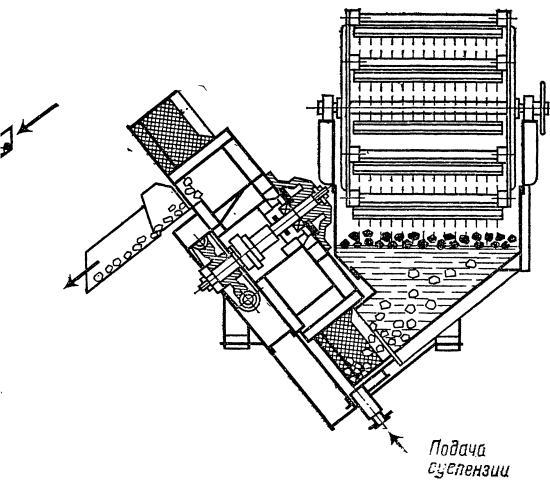
Если вынуть из воды твердое тело, оно будет мокрым, т. е. на его поверхности остается тонкая пленка воды, потому что между молекулами воды и поверхностью твердого тела существует взаимодействие, сцепление более прочное, чем между молекулами воды. Благодаря этому взаимодействию вода образует как бы оболочку вокруг

каждой твердой частицы, попавшей в нее. Эта оболочка, более плотная, чем остальной объем воды, обладает повышенной вязкостью, так как сцепление молекул воды в ней увеличивается под влиянием твердого тела, вернее его энергетического поля. Когда твердых частичек в воде много и толщина водных пленок на них близка к расстоянию между частичками, вся вода связана в эти плотные поверхностные пленки. Вязкость воды сильно возрастает, она препятствует быстрому оседанию тонких частиц суспензии. Суспензия становится устойчивой. В ней тонут только очень крупные и тяжелые по сравнению с суспензированным порошком частицы.

Плотность такой суспензии — величина промежуточная между плотностями воды и порошка. Можно приготовить достаточно устойчивую суспензию с плотностью 3 г/см<sup>3</sup> и выше, что вполне достаточно для разделения многих минералов. Частицы разделяемых минералов должны быть крупнее, чем частицы, из которых приготовлена суспензия.

Сепаратор для разделения в суспензии представляет собой конусообразный сосуд с мешалкой, в который непрерывно поступают суспензия и руда. С поверхности суспензии сгребаются всплывшие, а со дна конуса удаляются потонувшие куски. Теперь остается только отмыть куски руды от налипших частиц суспензии. Это легко сделать, так как они имеют различные размеры и могут быть разделены на грохотах. Магнетит и ферросилиций можно отделить электромагнитом. Из отмытых частиц снова готовится суспензия, так что она почти не расходуется в процессе обогащения.

Обогащение в тяжелых суспензиях широко применяется при переработке дешевых полезных ископаемых (угля, стройматериалов, фосфоритов и руд черных металлов) или бедного сырья (руд цветных и редких металлов). Основные преимущества метода заключаются в способности эффективно перерабатывать исходное сырье крупностью от 2—5 до 300 мм, а иногда даже до 1200 мм при высокой производительности (до 600—1000 т/ч) с получением отвального продукта, содержащего незначительное количество ценных компонентов, а также в возможности разделения сырья на продукты при незначительной разности в плотности ( $\pm 0,003$  г/см<sup>3</sup>). Кроме того, этот метод обогащения дешев, требует незначительных расходов электроэнергии, воды, утяжелителя и небольшой численности обслуживающего персонала; про-



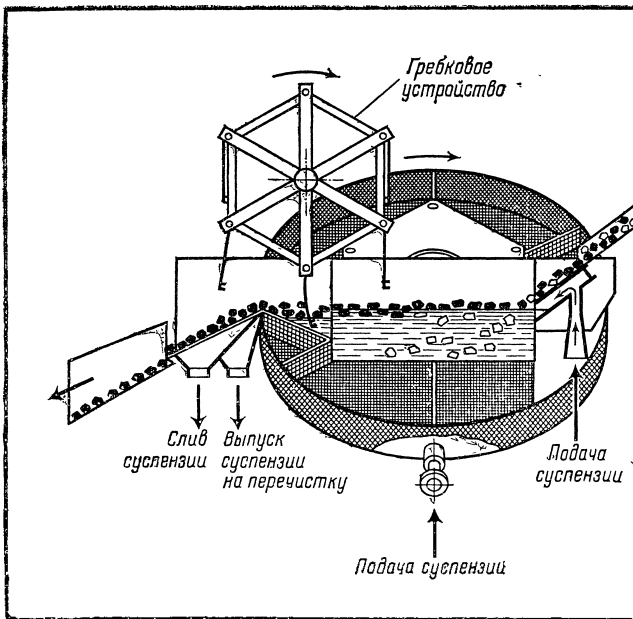


Схема обогащения в тяжелых суспензиях

цесс легко поддается автоматизации. Основным недостатком этого метода является необходимость отмывки исходного материала от глинистых частиц.

В качестве утяжелителя обычно используется гранулированный ферросилиций, магнетит или его смесь с ферросилицием, реже барит, пирит, песок, а также другие компоненты. Плотность суспензий регулируется автоматически.

В тяжелой суспензии обогащается прежде всего уголь, имеющий меньшую плотность (1,4) по сравнению с сопровождающим его сланцем (2,0) и пиритом (5,0).

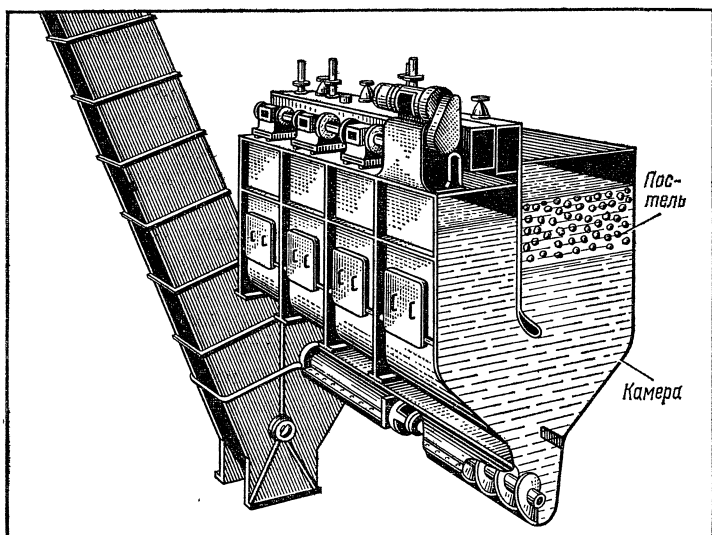
Свинцовые руды, содержащие крупные включения тяжелого свинцового блеска (галенита), могут обогащаться в тяжелой суспензии, приготовленной из того же тонкоизмельченного галенита. В тяжелых суспензиях могут обогащаться и многие другие руды, например вольфрамовые, оловянные, железные, марганцевые, свинцово-цинковые, медные, флюоритовые.

Применение суспензий позволяет выделить сразу, на первой стадии обогащения, большую часть пустой породы, что важно при высокопроизводительной, валовой добыче полезных ископаемых. Процесс обогащения в тяжелых суспензиях получает все большее распространение. Появились усовершенствованные аппараты, сочетающие процесс разделения в суспензии с разделением под действием центробежных сил в гидроциклоне. При этом увеличивают различие в массе частиц разделяемых минералов и разделение проходит более эффективно.

На основе современной физико-химической механики разработана теория нового метода повышения эффективности разделения в дисперсных системах с помощью низкочастотной вибрации. На углеобогатительных фабриках это позволило повысить производительность тяжелосредних сепараторов и снизить содержание золы в концентратах.

Существуют и другие, более универсальные способы разделения минералов по плотности. Наиболее распространен процесс, называемый отсадкой, в котором попеременно используются подвижность легких частиц и большая скорость падения в водной среде тяжелых минералов.

В отсадочной машине у поверхности воды имеется подстилка — лежащий на решетке слой крупных частиц магнетита или другого минерала с промежуточной для разделяемых минералов плотностью. Эта подстилка назы-



Отсадочная машина

вается «постелью». Бывают также отсадочные машины с решетом без постели.

В первой стадии цикла отсадки восходящая струя воды успевает только взрыхлить слой постели и чуть приподнять легкие минералы. Затем восходящая струя сменяется нисходящей. В этот момент вниз через постель и решетку устремляются тяжелые минералы. При этом нижние частицы успевают проскочить под решетку. Их место занимают частицы, лежавшие повыше. За ними следуют легкие минералы, но они не успевают проникнуть глубоко в постель: новый восходящий поток воды снова подбрасывает их над постелью и они смываются боковой струей воды, вместе с которой поступает на отсадку свежая руда. Слив отсадочной машины — легкий продукт, т. е. обогащенный уголь. В случае обогащения руд, наоборот, тяжелый концентрат собирается на дне отсадочного конуса. Он накапливается при каждом импульсе. Постель служит своеобразным клапаном, пропускающим тяжелые и задерживающим легкие минералы.

Быстро и тяжело «дышит» отсадочная машина. Частички руды, подпрыгивая в постели, постепенно перемещаются к разгрузочному концу. Секрет пульсаций не сложен. В боковой стенке камеры машины имеется диа-



фрагма или поршни, попеременно сжимающие воду в камере и втягивающие ее обратно. Чем чаще пульсации, тем более тонкие частицы минералов можно подвергать отсадке. Для разделения частиц крупностью меньше 1 мм число импульсов должно достигать 3000 в минуту.

В некоторых отсадочных машинах под слоем воды качается само решето: поднимаясь, оно создает нисходящий, а опускаясь — восходящий поток воды. На этом принципе основана и самая примитивная отсадка — промывка на решетке: его, наполнив измельченной рудой, встряхивали в бочке с водой.

Отсадка — самый распространенный и эффективный метод гравитационного обогащения. Одна из последних моделей отсадочной машины ОМ-24 имеет площадь постели 24 м<sup>2</sup> и может перерабатывать 400—650 т угля в час.

Частицы размером менее 1 мм уже не могут обогащаться гравитационными методами. Земное притяжение для таких частиц слишком незначительно, и они очень медленно опускаются в водной среде. Здесь вступают в действие другие силы — поверхностные, власть которых увеличивается с уменьшением размеров частиц и, следовательно, с увеличением их удельной поверхности (приходящейся на единицу массы).

Обогащение в струе воды по плотности было известно давно. Промывка в желобах, на шлюзах из бараньих шкур, отсадка на решетке — все эти способы мало изменялись на протяжении более чем тысячелетнего существования, вплоть до XIX в.

Когда проблема обогащения руд стала весьма актуальной, начали искать научное объяснение и пути совершенствования этих процессов. Француз Пернолэ в 1851 г. открыл законы падения рудных частиц в воде. Затем Борн описал их движения в восходящей струе воды. Узатис, Иордан, Спара, Риттингер, Ричардс, а за ними советские ученые Г. О. Чечотт и П. В. Лященко создали научные основы гравитационного обогащения полезных ископаемых.

В 50—60-х годах были проведены фундаментальные работы, основанные на принципах классической механики, по изучению процессов отсадки и других гравитационных методов обогащения (И. М. Верховский, В. И. Классен, Н. Н. Виноградов, Э. Э. Рафалес-Ламарка, Б. В. Кизевальтер, В. Н. Шохин, Г. Д. Краснов и др.). Зарождение процесса обогащения в тяжелых средах свя-

зано с именем Е. А. Слепцова, предложившего его в 1926 г. применительно к углю.

В последние годы заметно расширилась область применения гравитационных методов обогащения и увеличилась номенклатура используемого оборудования. Гравитационный процесс — основной для обогащения угля. Многие руды редких и драгоценных металлов успешно обогащаются гравитационными методами. Эти методы, как более дешевые, применяют для предварительной концентрации полезного ископаемого в цветной металлургии и при обогащении горно-химического сырья.

### Судьба золушки

При всей необходимости, полезности и эффективности угля необходимо отметить один существенный его недостаток: это одно из самых «грязных» в экологическом смысле полезных ископаемых. Угольные карьеры, романтически названные в одной популярной брошюре как «недра, открытые солнцу», представляют собой многокилометровые язвы на теле Земли, как и отвалы вскрышных пород, образующие пресловутые терриконы. Но это еще полбеды.

Отходы обогащения (хвостохранилища) и сжигания угля (золоотвалы) представляют собой пылящие, смердящие и самовозгорающиеся участки, на которых ничто не растет и никто не живет. Кроме того, при сгорании угля в атмосферу выбрасывается значительное количество окислов углерода, серы, азота, всего 0,5 т пылегазовых выбросов с каждой тонны угля. А добыча всего 1 т угля дает свыше 3 т отходов.

В последние годы перед угольной и топливно-энергетической отраслями промышленности остро встали вопросы создания безотходных технологий: рекультивации отвалов, утилизации хвостов обогащения и золы, пылеулавливания, переработки газов ТЭЦ, переработки угля на жидкое топливо.

Выяснилось, что практически все вредные компоненты, образующиеся при добыче, переработке и сжигании угля, могут быть использованы. Особенно ценными являются компоненты внешней и внутренней золы.

Золы различных углей отличаются по своему составу. Некоторые из них содержат значительные промышленные количества рассеянных элементов. Например, это один из основных источников германия. В других золах

имеются галлий, молибден, бериллий. Почти все золы содержат значительное количество алюминия. Правда, так называемый кремниевый модуль (отношение  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ) низок, но для получения кремнеалюминиевых сплавов они вполне пригодны. Такая установка сооружается в Экибастузе.

Отходы углеобогащения и зола после сжигания еще содержат 8–10% углерода. Поэтому производство строительных материалов, требующих обжига, возможно из этих отходов без затрат дополнительного топлива. Уже работают заводы по производству кирпича и аглопорита.

В углях содержится сера двух видов: в органической части горючей массы и в виде сульфида железа — пирита. Пирит может извлекаться из угля методами обогащения — в этом случае пирит может быть использован для производства серной кислоты, а железистый пиритный огарок применяется как добавка в цемент. Чтобы не допустить сгорания серы с углем, отчего образуется сернистый газ низкой концентрации и поэтому сложно утилизируемый, большую часть серы можно извлекать из угля с помощью специальных бактерий. Этот процесс еще не вышел из стадии опытно-промышленных исследований, но весьма перспективен.

Резко уменьшается количество вредных отходов сжигания при переработке угля в жидкое топливо. Технология этого процесса известна давно, и даже существуют природные аналоги. Вот что опубликовала газета «Социалистическая индустрия» 16 августа 1986 г.

В верховьях р. Чыбыда, к западу от Якутска, местные жители обнаружили месторождение... керосина. Таков удивительный сюрприз дикой северной природы. В недрах вечной мерзлоты ею создан уникальный завод по сухой перегонке каменного угля. Обширный пласт бурого угля на большой глубине самовозгорелся — это случается нередко. Тление продолжается уже длительное время. Под воздействием высокой температуры и колоссального давления начала выделяться темная маслянистая жидкость. По вертикальным микроскопическим разломам она вытесняется наверх и на отдельных участках выплескивается на поверхность, источая характерный запах керосина. Если поднести к ней горящую спичку, вспыхивает коптящее пламя.

Подобная промышленная установка, в которой процесс гидрогенизации угля ускоряется действием катализаторов, строится на КАТЭКе. Энергия будет поступать

отсюда в другие районы страны в виде не только электричества, но и жидкого топлива.

Научно-исследовательские работы показали высокую эффективность использования газификации угля не автономно, а в комбинированных энерготехнологических установках. Использование низкокалорийного газа в комбинированном цикле увеличивает КПД топлива до 50% (вместо 38% в традиционной энергетике) и обеспечивает глубокую переработку попутных продуктов. Технология безотходна и безвредна для окружающей среды. Выброс пыли на такой установке в 75 раз меньше, чем на обычной, окислов серы — в 10 раз, окислов азота — в 3 раза. Короче говоря, парогенераторная установка на угле чище теплофикационного блока, сжигающего газ. Таковы перспективные направления использования угля.

Еще Д. И. Менделеев в 1888 г. высказал идею подземной газификации угля. Позднее, в 1912 г., то же предложил английский химик У. Рамзай. В угольный пласт через специально пробуренные скважины вдувается воздух, и пласт поджигается. С другого конца отводится образующийся газ, содержащий главным образом окись углерода. Этот газ пригоден как энергетическое топливо, а также для синтеза углеводородов или аммиака.

В 1933 г. группа советских инженеров — И. С. Коробчанский, В. А. Матвеев, В. П. Скафа и Д. И. Филиппов — разработали проект подземной газификации угля бесшахтным способом. Газогенератор представляет собой горизонтальный канал в угольном пласте; воздушное и кислородно-воздушное дутье подается через наклонные и вертикальные скважины. По мере сгорания угля реакционные зоны перемещаются, и под действием горного давления выгоревшие участки заполняются породой. Хотя часть теплотворной способности угля расходуется в пласте, стоимость извлечения минимальна: исключаются строительство шахты, добыча и транспортировка угля, вся зола остается под землей. Это был первый процесс, совместивший добычу и переработку полезного ископаемого, получивший название «геотехнология». Но процесс подземной газификации угля пока считается неэкономичным. Причина в том, что получаемый таким способом газ хуже и дороже природного. Однако во многих случаях подземную газификацию можно сочетать с обычной добычей, извлекая этим способом уголь из менее доступных и бедных участков месторождения. Метод перспективен и для горючих сланцев.

При подземной газификации возможно получение и некоторых химических веществ — фенолов, бензолов, пиридина и т. д. Это уже целый химико-энергетический комбинат. Но пока это задача будущего.

## Сульфиды — ненавидящие воду

Пора чудес прошла, и нам  
Приходится подыскивать причины  
Всему, что совершается на свете.

*Шекспир*

### Блеск с обманкой

Трудно сказать, откуда у древних возникли представления о том, что в глубинах Земли расположены котлы с кипящей лавой, насыщенные серой, но они близки к истине. Едва уловимый запах сульфидных соединений, видимо, пробивается на поверхность Земли. Например, сообщалось, что в Финляндии геологи использовали собаку — немецкую овчарку Лари — для поиска месторождений, содержащих серный колчедан. На площади 3 км<sup>2</sup> Лари нашла в 5 раз больше образцов, чем специалист-геолог.

Расплавленная магма является источником большинства рудных месторождений. В частности, наиболее важные образования сульфидов цветных металлов связаны с гидротермальными минеральными телами, которые возникли из растворов металлов, содержащих также сероводород, сернистый натрий и другие соединения серы. Растворы под давлением двигались к поверхности Земли, и при снижении температуры из них кристаллизовались соединения  $PbS$  — галенит,  $ZnS$  — сфалерит,  $CuFeS_2$  — халькопирит и другие сульфиды цветных металлов.

Так образовались полиметаллические месторождения, в которых свинцу, цинку и меди сопутствуют золото, серебро, мышьяк, висмут, а иногда олово, барит, ртуть, никель, кобальт, селен, теллур, молибден и другие ценные компоненты.

Первоначальные названия сульфидным минералам дали по внешним признакам еще средневековые горняки. Сульфиды с металлическим блеском, хорошей спайностью получили названия: свинцовый блеск (галенит), медный блеск (халькозин —  $Cu_2S$ ), сурьмяный блеск  $Sb_2S_3$  (антимонит), кобальтовый блеск (кобальтин —  $CoAsS$ ).

Сульфиды с полуметаллическим или алмазным блеском, чуть прозрачные в тонком сколе, получили название обманок: серебряная обманка (прустит), цинковая обманка (сфалерит), они мало похожи на другие рудные минералы. Сульфиды, содержащие железо, получили название колчеданов: медный колчедан (халькопирит), железный колчедан (пирит —  $\text{FeS}_2$ ), мышьяковый (арсенопирит —  $\text{FeAsS}$ ), никелевый (пентландит —  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ ), оловянный (стаппин —  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ ).

Всего известно около 200 сульфидных минералов, многие из которых имеют промышленное значение. Они составляют 0,25% земной коры. Но в рудах они, как правило, вкраплены в виде тонких частичек, составляющих доли миллиметра, и извлечь их оттуда было бы непросто, если бы не одно их удивительное свойство.

### От любви до ненависти — один шаг

Существует легенда, что жёпа шахтера, добывавшего медные сульфидные руды, во время стирки то ли его одежды, то ли мешков из-под руды заметила, что частички медного колчедана всплыли на поверхность воды вместе с каплями жира. Наблюдательная женщина поняла, что жир избирательно смачивает медный колчедан и он всплывает (по-английски flotation — флотировует), в то время как порода тонет в воде.

Различия в смачиваемости минералов водой и маслом легли в основу процесса масляной флотации, который оказался предтечей пенной флотации. В настоящее время этим методом извлекаются из руд все сульфидные и многие несulfидные материалы, в том числе мелкие частицы угля. Этим методом во всем мире перерабатывается свыше 1 млрд т руд и углей в год. Есть флотационные обогатительные фабрики производительностью до 100 тыс. т руды в сутки; это значит, что на фабрику ежедневно прибывают несколько железнодорожных составов с рудой.

Первое упоминание о процессе, подобном масляной флотации, имеется в древней персидской рукописи XV в. Руду, содержащую «голубой камень» — азурит, смешивали с растопленной смолой, а затем заливали водой. Смола избирательно прилипала к азуриту и всплывала на поверхность, в то время как другие минералы оставались под водой. Аналогичный метод применялся при производстве ультрамарина.



Лес каменноугольного периода (около 300 млн лет назад)



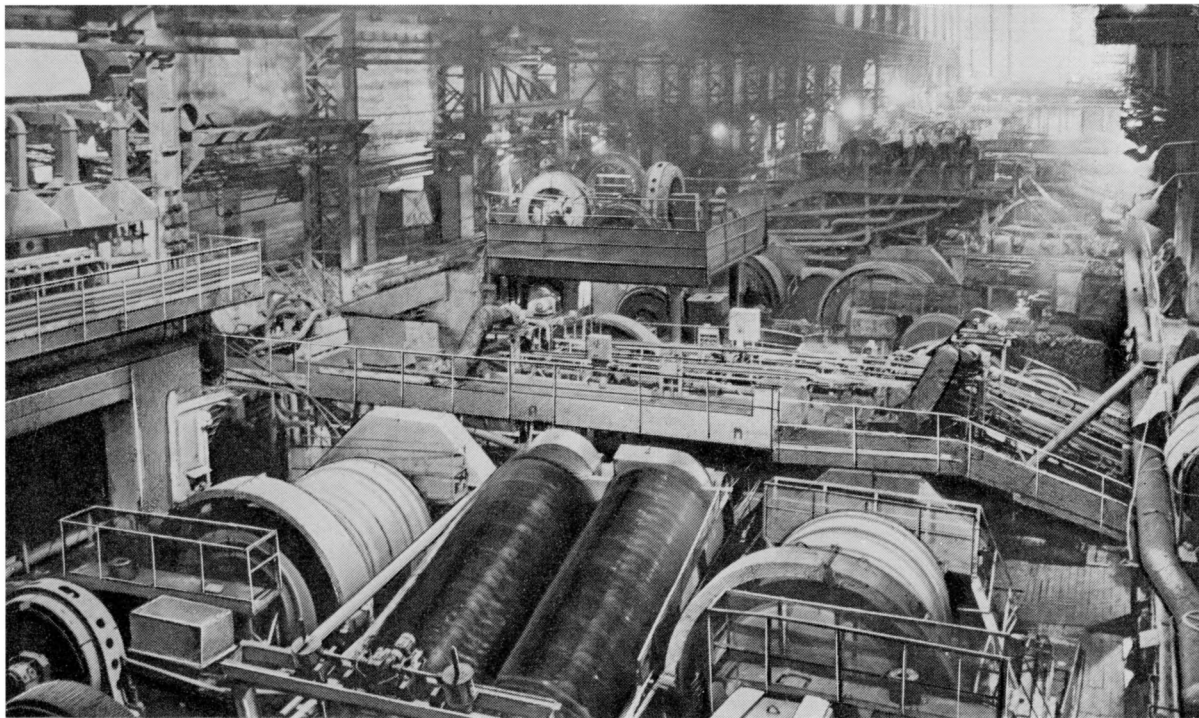




**Флотационный цех обогатительной фабрики**



Тырныауская обогатительная фабрика



Цех измельчения обогатительной фабрики

Это изобретение было забыто, и в 1860 г. англичанин Вильям Хайнс получил патент на масляную флотацию, основанную на том же самом принципе. По предложению Хайнса руду, содержащую сульфидные минералы, смешивали в процессе измельчения с маслом (в отношении от 1:9 до 1:5) и водой. Масло смачивает сульфиды, собирается в крупные капли и всплывает вместе с захваченными частицами сульфидов над поверхностью воды. Частицы пустой породы, не смоченные маслом, остаются в воде. Этот способ применялся некоторое время для обогащения медно-золотой руды в США и давал очень хорошие по тому времени результаты — в концентрат извлекалось 80% ценных минералов. После флотации масло отмывалось от концентрата и использовалось повторно, но, несмотря на это, расход его был все же велик — 5–10 кг на 1 т руды. От этого метода пришлось отказаться. Но вскоре он был существенно усовершенствован.

Совершенствование процесса флотации, продолжающееся уже более 120 лет, основано на изучении физико-химических поверхностных явлений, физики твердого тела, теории растворов и других фундаментальных научных направлений. Флотация является важнейшим практическим приложением этих областей науки, поскольку на флотационном обогащении руд основано извлечение минералов большинства цветных металлов, а также апатита, графита, серы, калийных солей, в какой-то степени угля, марганца и многих других полезных ископаемых.

Заметим, что в мире минералов тоже есть свои симпатии и антипатии, играющие не последнюю роль в их личной жизни. Известны вещества, хорошо смачиваемые водой, и есть такие, которые «выходят сухими из воды». Первые называются гидрофильными, что в переводе с греческого означает буквально «любящие воду», вторые — гидрофобными — «ненавидящими воду». Среди этих «ненавидящих воду» веществ довольно много таких, которые хорошо смачиваются маслом — олеофильных.

Сродство минералов и жидкостей определяется энергией взаимодействия их молекул в поверхностных слоях, т. е. поверхностным натяжением на межфазных границах вода—минерал и масло—минерал. Если поверхностную энергию для жидкости относительно легко измерить, то для природных кристаллов с их дефектами кристаллической решетки, изоморфными примесями и неровными сколами — довольно сложно. Поэтому флотация пока остается в какой-то степени эмпирической наукой, разви-

тие которой связано с большим количеством различных изобретений.

Основания физико-химической теории поверхностных и капиллярных явлений были заложены в работах французского физика П. С. Лапласа в 1806—1807 гг., а затем англичанина Т. Юнга. В 1879 г. вышла работа профессора Казанского университета И. С. Громеки по теории капилляров, объясняющая процессы смачивания. В конце 70-х годов XIX в. американским ученым В. Гиббсом были выдвинуты представления о поверхностной энергии и адсорбции, развитые в начале XX в. русским ученым Л. Г. Гурвичем, а также И. Ленгмюром и В. Д. Гаркинсом. Обобщенную теорию физикохимии поверхностных явлений, включающую основы флотации, создал в 30-х годах академик П. А. Ребиндер.

В 1877 г. братьями Бессель в Дрездене был запатентован на первый взгляд обычный метод масляной флотации графита. Незначительная, казалось бы, его особенность состояла в том, что, нагревая воду, братья Бессель получали в пульпе пузырьки водяного пара. Только спустя 9 лет они осознали действительное значение этого нововведения: графит значительно легче прилипал к пузырькам газа и быстро выносился на поверхность воды, где образовывался слой пены, содержащий, кроме воды, чистый графит.

В 1886 г. Бессели изменили способ введения газа в пульпу. Вместо кипячения добавлялись кислота и карбонаты, которые в результате химической реакции между собой «производили» углекислый газ, выделяющийся из раствора.

В других странах открытие братьев Бессель не было известно. Поэтому флотация пузырьками газов была вновь изобретена через несколько лет итальянцем Фроменом, американцами Дельпра и Поттером. В их процессах расход масла составлял 1—1,5% вместо 15—20% при масляной флотации. Процесс пенной флотации стал применяться довольно широко для обогащения сульфидных руд и графита. В 1901 г. на фабрике Дельпра этим способом было получено 6 млн т цинкового концентрата. Руду из отвалов, содержащую 20% цинка, в виде его сульфида — цинковой обманки — загружали в горячий раствор серной кислоты или бисульфата натрия. При этом выделяющийся газ выносил на поверхность частички цинковой обманки. Содержание цинка в концентрате составляло 42%. В Австралии с 1901 г.

## Схема движения пульпы в гидроциклоне

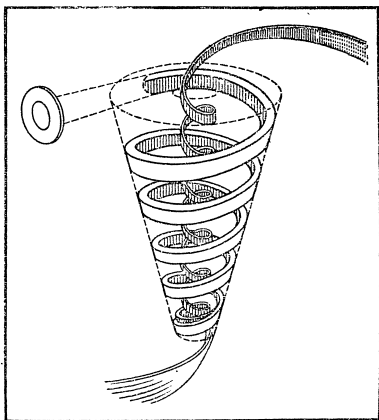
также началось флотационное обогащение сульфидных свинцовых руд.

Химический способ выделения пузырьков газа, а также кипячение воды были явно неэкономичными и, конечно, не самыми простыми способами введения газа в пульпу. Но только в 1906 г. был предложен простой способ засасывания воздуха вращающейся в пульпе мешалкой, а еще позже, в 1914 г., метод вдувания воздуха через пористое дно или опущенные в пульпу трубки.

Ранее англичанин Эльмор запатентовал еще два способа образования газа в пульпе: электролиз воды и создание вакуума над ее поверхностью. Эти методы относительно недавно были вторично рождены и использованы на новом, более высоком уровне в СССР: в виде электролитической и компрессионной флотации.

В 1905 г. компания «Миперал Сепарейшен», скупив предварительно несколько патентов по флотации, получила так называемый базисный патент. Именно в это время началось широкое промышленное освоение пенофлотационного процесса. В базисном патенте было собрано все наиболее существенное из того, что было известно в масляной флотации, и, в частности, небольшие расходы реагентов: 0,02–0,5% олеиновой кислоты или менее 1% масла. Базисный патент повлек за собой множество судебных процессов, на которых оспаривалась законность его выдачи. 11 декабря 1916 г. Верховный суд США вынес решение об отмене базисного патента компании «Минерал Сепарейшен» за исключением пункта о применении масла менее 1%. По времени это событие совпадало с годом весьма быстрого роста цен на цветные металлы в связи с первой мировой войной.

Настоящий переворот во флотации, сделавший ее универсальным процессом обогащения почти всех полезных ископаемых, настал в связи с использованием



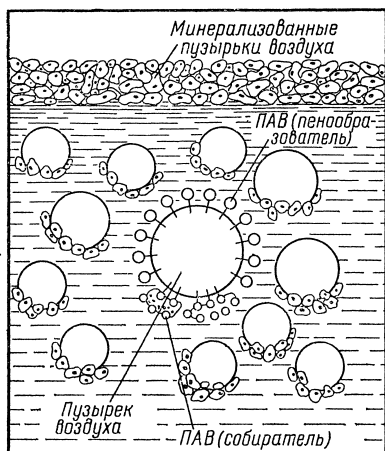


Схема минерализации пузырьков воздуха при флотации в присутствии поверхностно-активных веществ

Флотационных реагентов — поверхностно-активных веществ (ПАВ), избирательно закрепляющихся на поверхности определенных минералов. ПАВ пришли на смену масляным реагентам, доставшимся пенной флотации в наследство от масляной. Масла эффективны только при флотации

сильно гидрофобных минералов: графита, молибденита, серы, талька, угля, а также некоторых сульфидов.

Способность ПАВ адсорбироваться на границах раздела фаз вода—газ и вода—минерал предопределяет ничтожно малый расход таких реагентов, поскольку почти все молекулы ПАВ сосредоточены не в объеме, а только на границах. Для покрытия  $1 \text{ м}^2$  поверхности плотным слоем ПАВ требуется всего около  $1 \text{ мг}$  вещества. Поверхностные пленки совершенно меняют гидрофобность минералов и поверхностное натяжение на границах.

Академик П. А. Ребиндер назвал ПАВ «гомеопатическими средствами техники». Для любой границы раздела можно подобрать ПАВ, которые не только концентрируются на этих границах (адсорбируются), но и ориентируются определенным образом, регулируя в желательном направлении характер взаимодействия поверхностей. При этом ПАВ не нужно «намазывать» на границу раздела как краску: молекулы ПАВ самопроизвольно, проявляя свою поверхностную активность, устремляются на предназначенный им рубеж, покрывают его равномерным слоем и прочно связываются с пограничными молекулами вещества.

Поверхностно-активные вещества, адсорбирующиеся на минералах и гидрофобизирующие их поверхность, получили название коллекторов, или собирателей. Эти реагенты, избирательно адсорбируясь на поверхности определенного минерала (а все началось с сульфидов), «собирают» его в верхнем пенном слое.

Обнаружение собирательных свойств у немасляных, растворимых в воде веществ вначале показалось столь невероятным, что первому изобретению в этой области не придали никакого значения, и ему суждено было почти 10 лет пролежать в архивах американской медной компании Юта. Это изобретение было сделано в 1915 г., т. е. почти через 40 лет после открытия братьев Бессель.

В 1921 г. Перкинс и Келер установили, что слабо-растворимые органические соединения, содержащие двухвалентную серу и трехвалентный азот, обладают собирательными свойствами. В частности, органические производные сероводорода оказались прекрасными собирателями для сульфидных минералов. Более того, после их вторичного открытия в 1925 г. щелочные соли ксантогеновой кислоты стали классическими флотационными собирателями сульфидов. В следующем, 1926 г., были открыты конкуренты ксантогенатов — эфиры дитиофосфорной кислоты, которые во флотации получили название «аэрофлотов». Для флотации окисленных минералов (кварца и др.) тогда же были предложены катионные собиратели — амины, полярная группа которых содержит производные аммиака и заряжена положительно. Вместе с жирными кислотами, их мылами и новыми моющими веществами (алкилсульфатами, сульфонатами и др.) ксантогенаты, аэрофлоты и амины представляют класс полярно-аполярных собирателей.

Следующей практической задачей стало разделение сульфидов между собой или их последовательное извлечение. Поскольку в руде одновременно присутствуют сульфиды различных металлов, необходимо получить отдельные пенные концентраты меди, свинца, цинка и железа, которые металлурги перерабатывают различными методами. Вещества, которые регулируют адсорбцию собирателей на тех или иных минералах, получили название модификаторов флотации.

Первым помощником ксантогенатов при флотации сульфидов оказался растворенный в воде кислород. Он окисляет в определенной последовательности часть ионов серы на поверхности сульфидов, переводит окись серы в раствор и заряжает поверхность минерала — подготавливает ее к реакции с собирателем. Степень окисления зависит от степени кислотности среды (рН). Например, в слабокислой среде первым окисляется пирит. Кислород (или другой химический окислитель поверхности) первоначально подготавливает минерал к взаимодействию



вну с собирателем, образуя на поверхности заряженные положительно участки. При более сильном окислении сульфидов, когда в раствор начинают переходить ионы не только серы, но и металла, флотация данного минерала прекращается, так как «отслаивание» ионов происходит вместе с поверхностной пленкой собирателя, а природно-гидрофобная поверхность сульфидного минерала, окисляясь, становится гидрофильной.

Если поверхность сульфидного минерала «переокислена» сверх нормы, необходимой для взаимодействия с ксантогенатом, или сама природа нацело окислила сульфид, превратив его в окисел, минерал можно «подсульфидизировать». Для этого применяется растворимый сульфид — сернистый натрий. Его сульфидизирующее действие на окисленные минералы железа, меди, цинка, свинца и др. было открыто и применено во флотации Шварцем еще в 1905 г. Но если минерал «пересульфидизировать», он опять не будет флотировать, пока не окислится до нужной степени. Поэтому сульфидизация иногда применяется и для депрессии минералов — их гидрофилизации.

В 1913 г. Брэдфорд в Австралии открыл первый активатор флотации — ионы меди на цинковую обманку. Цинковая обманка флотируется ксантогенатом в различных условиях по-разному. Однажды заметили, что на двух совершенно одинаковых лабораторных флотомашинках одна и та же проба руды дает извлечение цинка 50 и 90%. Машины различались только материалом, из которого была сделана мешалка — импеллер: в одной машинке он был деревянный, а в другой медный. Растворимость меди в воде ничтожно мала, тем не менее это небольшое количество ионов меди активировало флотацию сульфида цинка. Для флотации цинковой обманки перед подачей собирателя — ксантогената — в пульпу стали добавлять медный купорос.

Однако было замечено, что цинковая обманка некоторых месторождений отлично флотируется и без медного купороса. Тщательный анализ показал, что в некоторых разновидностях цинковой обманки присутствует медь в виде микроскопических пылевидных вкраплений халькопирита. Это пример природной активации, которая до сих пор доставляет обогатителям много хлопот, так как разделение минералов меди и цинка из комплексных медно-цинковых руд в значительной степени осложняется их совместной флотиремостью.

Подавление флотации отдельных минералов может быть связано либо с вытеснением собирателя с их поверхности, либо с гидрофилизацией этой поверхности.

Одним из наиболее часто применяемых подавителей сульфидов является, кроме сернистого натрия, ион гидроксила  $\text{OH}^-$ , адсорбирующийся на минералах в случае избытка щелочи. Он, как и полярный конец анионного собирателя (ксантогената, мыла и др.), заряжен отрицательно и, следовательно, является конкурентом собирателя на поверхности минерала. Точно таким же конкурентом является и гидросернистый ион  $\text{HS}^-$ , образующийся в пульпе при гидролизе сернистого натрия. Конкуренция между депрессором и собирателем регулируется их сродством к соответствующим ионам на поверхности минералов. Ион  $\text{OH}^-$  при соответствующей концентрации является депрессором пирита. Ион  $\text{HS}^-$  — депрессор кварца, активированного ионами железа и меди. Ион цианида  $\text{CN}^-$  образует прочные комплексные соединения с цинком, медью, железом, серебром, ртутью и никелем и является депрессором соответствующих минералов. Бихромат калия был одним из первых депрессоров: в 1912 г. австралийцы Лаури и Гринуэй применили его для подавления одного из наиболее легкофлотируемых сульфидов — свинцового блеска. При этом ионы хрома еще влияли на флотируемость цинковой обманки, и при переработке свинцово-цинковых руд этот способ давал возможность отдельно получить свинцовый и цинковый концентраты.

При подборе регуляторов pH в качестве щелочного агента применялась обычная известь. Вскоре было обнаружено, что по сравнению с другими щелочами известь значительно сильнее подавляет флотацию пирита, что связано с избирательной адсорбцией ионов кальция на его поверхности.

Многие собиратели являются «по совместительству» пенообразователями, а большинство непенообразователей улучшает собирательное действие. Поэтому комплекс реагентов, участвующих во флотационном процессе, в совокупности с ионами, перешедшими в пульпу из минералов и в результате истирания и окисления оборудования (главным образом железа), является сложнейшим, необычайно тонким инструментом, с помощью которого осуществляется избирательная флотация. Влияние многочисленных факторов: концентрации реагентов, продуктов их взаимодействия, адсорбции на минералах, рас-

творимости минералов и реагентов, адсорбции на пузырьках, количества, крупности и скорости движения пузырьков и частиц и т. д. — все это ставит флотацию в ряд сложнейших технологических процессов. Действие многочисленных факторов не ограничивается объемом пульпы. Столь же большое значение имеют процессы, происходящие в пенном слое, образовавшемся в результате поднятия пузырьков с минералами на поверхность.

Широкое применение флотации в горно-перерабатывающей промышленности стимулировало развитие ряда новых направлений физической химии: химии поверхностных явлений, коллоидной химии, теории пен, теории растворов, физики твердого тела, электрохимии и т. д.

В развитии теории флотационного процесса огромная заслуга принадлежит советским ученым: И. Н. Плакси-ну, Б. В. Дерягину, М. А. Эйгелесу, В. И. Классену, В. А. Глембоцкому, В. И. Мелик-Гайказяну, С. И. Полькину, Г. С. Бергеру, Р. Ш. Шафееву и др. Из иностранных ученых необходимо отметить американского ученого А. М. Годена и австралийского ученого И. В. Уорка.

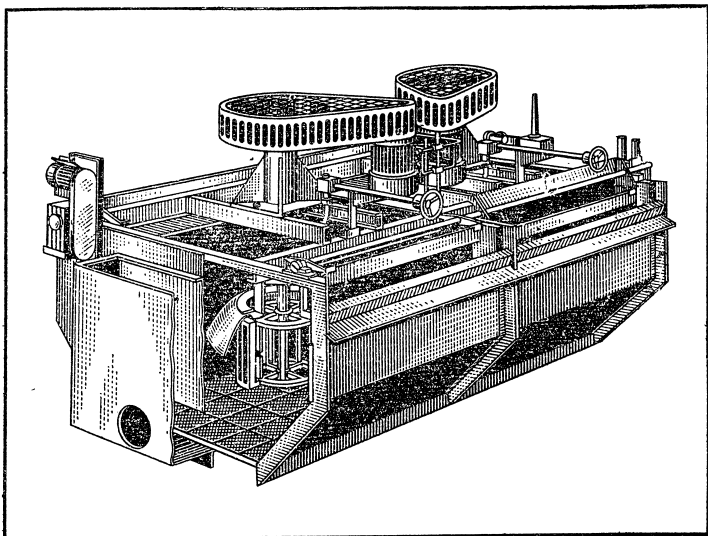
Около 100 лет минуло со времени начала работы первых флотационных фабрик. За это время изменились и набор флотореагентов, и конструкции флотационных машин, и приемы обработки руды, и режим флотации, и даже характер руд — объектов обогащения. Из случайно подмеченного факта избирательного прилипания и всплывания минералов выросла сложнейшая отрасль науки, оперирующая всем комплексом современных знаний. Из примитивного конуса для отделения всплывающих минералов выросла тончайшая универсальная технология, почти обязательное звено в цепи превращения любого ископаемого в полезный материал.

### Полиметаллы Рудного Алтая

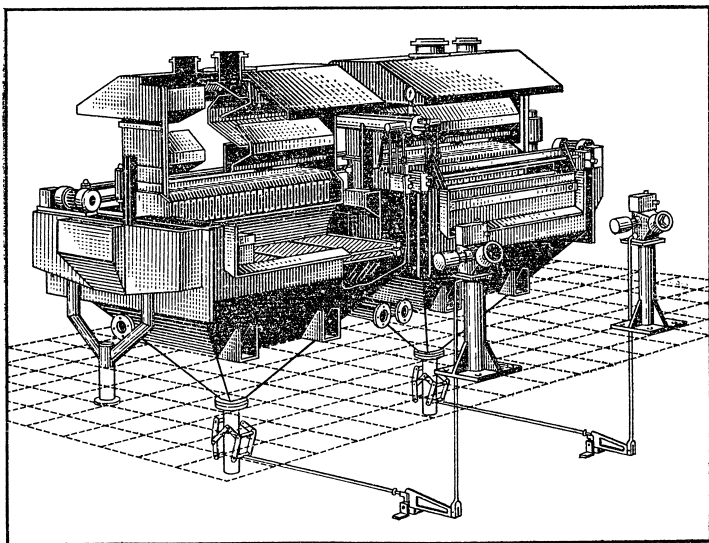
Вслед за освоением Урала в конце XVIII в. была начата разработка полиметаллического месторождения на Рудном Алтае, названного Риддерским\*. Его открыл, наладил добычу руды и извлечение из нее серебра и меди офицер Колывано-Воскресенского горнозаводского округа Филипп Риддер. Он был внуком шведа, взятого в плен при Петре I и женившегося на русской.

---

\* Раздел написан по материалам статьи А. Розанова. См.: Соц. индустрия. 1986. 22—23 апреля.



Механическая флотационная машина с роторным аэратором



Пневматическая флотационная машина пенной сепарации

Богатый серебром рудник, принадлежавший царской фамилии, давал немало драгоценного металла. Из этого первого в России серебра был выкован огромный надгробный памятник Александру Невскому; эти серебряные «врата» выставлены сейчас в одном из первых залов Эрмитажа.

К концу XIX в. разведанные запасы риддерских руд кончились, а глубокой разведки не проводилось. Царский кабинет сдал Риддерские предприятия, а также угольные копи Экибастуза в концессию Русско-Азиатскому объединенному обществу, львиная доля которого принадлежала английскому дельцу Дж. Уркварту. Шла первая мировая война, и поднявшийся спрос на свинец, медь и цинк приносил акционерам огромные прибыли.

11 мая 1918 г. В. И. Ленин подписал Декреты Совнаркома о национализации иностранных концессий на Алтае, Урале и в Прииртышье. Английские инженеры, покидая Риддер, сняли важнейшие детали с механизмов и аппаратов, остановили шахтные насосы и затопили рудник. На поверхности лежала добытая раньше руда, но до Экибастуза, где из риддеровского сырья выплавляли металлы, было 700 верст, да и заводы там тоже замерзли.

В марте 1921 г. Уркварт обратился к Совнаркому с предложением: предоставить ему дореволюционные концессии на взаимовыгодных условиях. Цветные металлы, золото и серебро были необходимы разрушенной, голодающей, промышленно отсталой стране, и Ленин дал указание Красину начать переговоры с Урквартом — злейшим врагом Советской власти. При Высшем совете народного хозяйства был образован Концессионный комитет, в который вошли специалисты по технике и экономике.

Началась торговля. Уркварт предложил нашей стране 5% добытых металлов, комитет добивался 7,5%. В. И. Ленин принял решение начать работы на руднике, с тем чтобы в случае несговорчивости концессионера обойтись без него.

В октябре 1921 г. вместо прежнего малограмотного, хотя и храброго красного командира Е. Доменко управляющим Риддера был назначен Рудольф Дрейман. Латышский большевик с 1905 г. из Лиепай, профессиональный революционер, организатор подпольных типографий и побегов из тюрем, сам бежавший с царской каторги, Дрейман встретил революцию в Нарымском крае.

«В октябре 1921 г., — вспоминал Р. Дрейман, — по распоряжению Владимира Ильича Ленина я был назначен директором Риддерского рудника... Перед отъездом зашел в Совнарком, но с Владимиром Ильичем на этот раз встретиться не удалось. Управляющий делами СНК тов. Горбунов передал мне от имени Ильича несколько напутственных указаний... Владимир Ильич называл Риддер богатейшим в мире месторождением цветных металлов, напоминал, что иностранцы вновь добиваются концессии на рудник. Поэтому он предлагал мне своей работой доказать, что молодая Советская власть может эксплуатировать свои богатства и без помощи иностранцев.

В один из октябрьских дней я выехал из Москвы. На Риддере был полный застой. Уезжая, урквартовцы затопили все шахты. Откачивать воду не было никакой возможности, потому что насосы остались внизу. Узкоколейная дорога была разрушена. Единственным средством сообщения от уездного Усть-Каменогорска была старенькая дрезина. На протяжении 96 км мы шесть раз сваливались с рельсов. Ставили дрезину на место, двигались дальше. Поселок Риддер, где жили рабочие, производил убийственное впечатление — холод, мрак, мертвая тишина. Предстояло найти подход к людям, потерявшим надежду...»

В окрестной тайге бродили банды. Село защищал отряд ЧОН во главе с В. Лигером-Свирским, тоже латышом. Дрейман стал бойцом отряда, а по субботам весь отряд работал в ледяной воде, пытаясь извлечь затопленные насосы.

«В день приезда новый директор нанес визит технику Врублевскому. Полный, бородатый, очки в золоченой оправе, тот колдовал над тисками с напильником в руках.

— Добрый день, Владимир Александрович! Вижу, вы металлист, как и я. Разрешите узнать, над чем вы трудитесь?

— Зажигалочки мастерю-с. Из заводского железа-с. За что бывший директор обещал пустить меня в расход-с. А вы, простите, кем являетесь?

— А я, простите, новый директор. Дрейман. Но пускать вас в расход не собираюсь. Напротив, учиться пришел.

— Это чему же?

— Вас рекомендовали как специалиста цветной металлургии. А мне срочно надо постигать ее азы. Одол-

жите книги, какие найдутся. Готов немедленно выслушать ваши соображения, как помочь предприятию вылезти из беды. Если, конечно, готовы служить России.

— А знаете ли, сударь, — взорвался Врублевский, — что мы здесь по золоту гуляем? Не в фигуральном — в прямом смысле. У меня много лет лежит проект золотоизвлекательного завода. А сырье — необозримые рудничные отвалы, накопившиеся за сто лет.

— Найдутся ли у вас другие единомышленники среди технического персонала?

— Не так их много... Есть прекрасный инженер Державин. Но у него папаша — местный купец второй гильдии. Мельницей владеет. «Гидра контрреволюции», по выражению гражданина Доменко. Посему инженер Державин предпочитает безмятежно заниматься своей уникальной коллекцией бабочек.

— Можете его немедленно пригласить? И сразу подумайте об опытных рабочих, способных найти и восстановить оборудование. Для них выделим продовольственные пайки».

В феврале 1922 г. Лигер-Свирский повез в Семилатицк первый 4-килограммовый кирпичик золота, чтобы сдать его в Госбанк. В сентябре 1922 г. ВСНХ получил докладную записку Дреймана:

«Постановлением Президиума ВСНХ Риддерское предприятие переведено на состояние технической охраны... по той причине, что Риддерское свинцово-цинковое дело на Алтае принадлежит к числу предприятий, требующих для своего развития значительных материальных затрат, которые при настоящем тяжелом состоянии финансов государство не в силах произвести...

Вследствие этого мной был возбужден вопрос о добыче золота из окисленных руд с тем расчетом, что операция эта, выгодная сама по себе, даст возможность лучше осуществить техническую охрану предприятия... За время от начала пуска золотоизвлекательной фабрики получено 19 фунтов 74 золотника золота и 3255 пудов концентрата. Средний процент извлечения золота — 46,5%. Цифра эта может показаться низкой, но если принять во внимание, что по своему строению риддерские руды с трудом поддаются амальгамации, и если сравнить достигнутые нами результаты с работами прошлых лет (максимум — 26 проц. извлечения), то нельзя не признать операцию текущего года весьма удовлетворительной...

Одновременно приступили к постройке небольшой шахтной печи для выплавки из концентрата свинца с попутным извлечением благородных металлов».

Через несколько дней Уркварту было отказано в концессии.

В 1923 г. в Риддере был построен электролитный завод производительностью 10 пудов цинка в сутки, восстановлены Риддерский и Сокольный рудники, запово построена обогатительная фабрика, отремонтирована железная дорога до Усть-Каменогорска.

Сейчас Лениногорский полиметаллический комбинат (бывший Риддерский) — передовое предприятие цветной металлургии по комплексному использованию минерального сырья. Здесь создавались и отрабатывались технологические схемы флотационного обогащения полиметаллических руд: прямая селективная и коллективно-селективная.

При прямой селективной флотации руду измельчают до освобождения всех минералов из сростков. Затем флотируют один или несколько наиболее легко флотируемых минералов, подавляя флотацию других. Легче всего выделить сульфиды свинца и меди, применяя в качестве собирателя ксантогенат. В тот же концентрат попадут свободные зерна золота и серебра. Для подавления кварца применяется жидкое стекло (силикат натрия), пирита — известь, цинковой обманки — цинковый купорос и цианид.

Медно-свинцовый концентрат легко разделить, подавляя один из минералов, присутствующий в меньшем количестве. Медные минералы подавляют цианидом (при большой концентрации), при этом галенит флотируется ксантогенатом. Можно, наоборот, подавить галенит хромпиком ( $K_2Cr_2O_7$ ), а медные минералы сфлотировать. Золото и серебро перейдут при этом в пенный продукт и могут быть извлечены в металлургическом переделе свинцового или медного концентрата. При применении цианида необходимо учитывать, что золото и серебро растворяются в нем и могут быть частично потеряны в растворе. Для предотвращения этого в пульпу добавляют активированный уголь, который поглощает золото из раствора. Уголь хорошо флотирует и попадает вместе с золотом в пенный концентрат. В металлургическом переделе он сгорает, а золото извлекается.

Из хвостов медно-цинковой флотации извлекают сначала цинк. Для этого подавленную в предыдущем цик-



ле цинковую обманку активируют медным купоросом и, добавив в пульпу собиратель, флотируют. Вместе с цинком в концентрат попадает изоморфно присутствующий в цинковой обманке кадмий. После флотации цинка в руде остается еще один сульфидный минерал — пирит. Этот сульфид железа ценен не железом, а серой; он является сырьем для производства серной кислоты. Кроме того, с пиритом часто связаны тонкие вкрапления золота. Пирит, подавленный в предыдущих циклах известью и цианидом, флотируют после добавления кислоты. Хвосты пиритной флотации направляются в отвал.

Схема последовательного выделения сульфидных минералов имеет тот существенный недостаток, что через каждый флотационный цикл проходит почти полностью вся руда. Гораздо выгоднее сразу отбросить пустую породу, выделив все сульфидные минералы в коллективный концентрат. При этом измельчение руды можно производить в две стадии. Так как сульфидные минералы чаще всего связаны друг с другом, задача первой стадии — отделить сростки сульфидов от кварца. Это требует более грубого измельчения и обходится гораздо дешевле, чем высвобождение каждого из сульфидных минералов. А если учесть, что 87% всех энергетических затрат на фабрике приходится на измельчение, эффект от более грубого помола довольно значительный.

Сростки сульфидов флотируют небольшими дозами ксантогената, чтобы не слишком сильно активировать минералы и не затруднять их последующее разделение. Как говорится у обогатителей, коллективную флотацию сульфидных минералов ведут «на голодном режиме». Тем не менее благодаря хорошей флотируемости сульфидов они довольно полно переходят в пенный концентрат.

Этот концентрат доизмельчают, чтобы разъединить сульфидные минералы, и обрабатывают серпистым натрием, который способен вытеснить ксантогенат с поверхности. Далее селективную флотацию ведут последовательно, но уже с гораздо меньшим количеством материала, что дает возможность сэкономить реагенты. В хвостах селективной флотации коллективного сульфидного концентрата после удаления меди, свинца и цинка остается пирит.

Существует множество разнообразных сочетаний сульфидных минералов в рудах, и для каждого сочетания выработано несколько возможных реагентных режимов

флотации. Эти режимы учитывают не только содержание отдельных минералов, но и степень их окисленности, размеры вкраплений в пустую породу, характер сростков минералов между собой, а также требования, предъявляемые металлургами к флотационным концентратам.

Например, присутствие золота в медном или свинцовом концентрате не мешает металлургам, а только увеличивает ценность концентрата, так как в процессе плавки золото переходит не в шлак, а в расплав металла. Иногда в концентрат даже специально добавляют золотоносный песок. Добавление песка необходимо для того, чтобы подобрать легкоплавкую шихту; при этом попутно извлекается золото. В дальнейшем, например в процессе электролитической очистки меди, золото остается на дне электролитных ванн.

Присутствие цинка в медном концентрате крайне нежелательно, так как при плавке медного концентрата в отражательных печах весь цинк улетучивается с отходящими газами. В газоходах он быстро оседает, образуя «настыли», которые забивают весь газоход. Кроме того, присутствие цинка увеличивает тугоплавкость шихты, что ведет к необходимости повышения температуры при плавке. Присутствие меди в цинковом концентрате также нежелательно, так как усложняет гидрометаллургическую переработку цинка.

В то же время активация цинковой обманки ионами меди, всегда присутствующими в пульпе медной руды, затрудняет селективную флотацию сульфидов меди от сульфидов цинка. Подавление флотации цинка осуществляется в этом случае сложным комплексом реагентов-депрессоров: цинковым купоросом, цианидом, сернистым натрием, известью. Каждый из этих реагентов выполняет одну или несколько функций. Цианид связывает ионы меди в пульпе и на поверхности цинковой обманки в нерастворимые комплексные соединения, нейтрализуя их активирующее действие; известь подавляет пирит и создает щелочную среду, которая необходима для флотации халькопирита. Кроме того, щелочная среда обязательна при применении цианида, так как в кислой среде ион цианида превращается в молекулу грозного яда — синильной кислоты, выделяющейся из раствора в виде газа.

Таков тонкий и сложный механизм комплексной переработки сульфидных полиметаллических руд. Из них получают медь, цинк, свинец, золото, серебро, кадмий,

селен, теллур, серную кислоту. Стоит вопрос о безотходной технологии: предполагается использовать также железо из пиритного огарка, хвосты обогащения для закладки выработанного пространства в шахтах, утилизировать шлаки и кеки выщелачивания для производства строительных материалов.

## Минералы XX века

Истинные законы — великие законы природы — обычно начинаются за третьим десятичным знаком, в тонких мелочах строения, в неуловимых чертах лица скрыты глубочайшие тайны мироздания. Надо присмотреться, вдуматься в каждый камень, и он сам расскажет тебе... о своем прошлом.

*А. Е. Ферсман*

### Редки ли «редкие элементы»?

XX век, ставший веком невиданного развития физики, химии и техники, потребовал применения новых материалов и новых элементов. Уран для ядерных реакторов; литий для термоядерных реакций; вольфрам, молибден, цирконий, титан для производства жаропрочных, кислотоупорных и сверхпрочных сплавов; цирконий, бериллий, церий, лантан, тантал, ниобий для производства ракет, атомных реакторов, электронных приборов.

Наш XX век — это век не только завоевания космоса, развития ядерной энергии, электроники, но и век освоения и использования в технике почти всех элементов менделеевской таблицы — от водорода до урана. Вот тогда-то и пошли в ход ранее не применявшиеся элементы с необычными свойствами, элементы, которые по странному недоразумению всего 100 лет назад были названы «редкими».

Название «редкие» вовсе не соответствует содержанию этих элементов в земной коре. Кладовая Земли богата многими из них даже в большей степени, чем обычными, например свинцом, серебром, оловом. Скорее под этим названием подразумевалась редкая применимость, но сейчас оно безнадежно устарело. И все же руды редких элементов слишком бедны, чтобы их можно было сразу направлять металлургам. Некоторые из них, например руды тантала, ниобия, лантана, бериллия, урана,

тория, содержат сотые доли процента этих металлов. Поэтому переработка руд редких элементов тоже начинается с обогащения.

Иногда использование определенных редких элементов обусловлено не только их полезными свойствами, но и возможностью их попутного получения при добыче более распространенных элементов.

Хотя апатит добывается из массивов щелочных пород как фосфорное сырье, в нем содержится значительное количество редких земель и стронция. Из нефелина апатит-нефелиновых руд можно получать глинозем, галлий, литий, рубидий и цезий. Открытие германия в магнетитах метаморфизованных осадочно-эффузивных месторождений и разработка технологии его извлечения из шлаков при плавке железных руд коренным образом изменяют состояние сырьевой базы этого элемента. Обнаружение в халькопирите и борните медистых песчаников рения, заключенного главным образом в форме мельчайших включений джезказганита, изменяет установившиеся представления об источниках его получения. Выявлены весьма высокие (до 10%) содержания ртути в некоторых сфалеритах, считавшихся основным источником цинка, а также кадмия, индия и германия. Высокая концентрация таллия обнаружена в некоторых сульфосолях свинца (геокронит, менегинит), известны золотоносные пириты и магнетиты, в которых золото можно обнаружить только с помощью микроанализатора или электронного микроскопа.

Первым практическим использованием редких элементов (еще в средние века) является применение висмута как антисептика в медицине и солей стронция в фейерверках. В начале нашего века в небольших количествах производились молибден, вольфрам, тантал, селен, литий и кадмий. Гафний и рений еще даже не были открыты. Рост потребления лития и стронция был связан с изготовлением трассирующих пуль и осветительных ракет. Стали, легированные вольфрамом, молибденом, ванадием, широко использовались в военной технике. Впервые из стали, содержащей цирконий, была отлита знаменитая дальнобойная немецкая пушка «Большая Берта». Сплавы с ниобием и танталом стали основой авиационных газотурбинных двигателей. Для самолетостроения с 1942 г. стали применять бериллиевые бронзы. Для производства первых атомных бомб, кроме урана, были необходимы бериллий, кадмий и тантал.

Научно-техническая революция, начало которой относят к 50-м годам XX в., тесно связана с освоением редких элементов. За каких-нибудь 20—30 лет было освоено производство почти всех элементов таблицы Менделеева. Редкие металлы стали компонентами различных специальных сталей и сплавов, потребителями которых явились ядерная техника, в том числе производство атомного и термоядерного оружия, атомная энергетика, электроника, особенно полупроводниковая, авиационная и ракетно-космическая техника.

С редких элементов слетел покров таинственности и экзотичности. Они обнаружили множество уникальных свойств не только в виде добавок как «витаминов» металлургии, но и в самостоятельном обличье, особенно в чистом и сверхчистом состоянии. Некоторые свойства редких элементов уникальны и пока недостижимы никакими заменителями. Незаменяемы иттрий и европий в цветном телевидении, лантаниды в люминофорах, литий в химических источниках тока и термояде, ниобий, тантал, ванадий, германий и галлий в сверхпроводниках, рений, ванадий, титан как катализаторы химических производств, ванадий, кадмий, стронций, кобальт, висмут, лантаниды, иттрий, скандий в магнитных материалах. Без редких элементов невозможно создание электронно-вычислительных машин, радиоэлектронных устройств, лазеров, оптической электроники, сегнетоэлектриков, пьезоэлектрических кристаллов, атомной и ракетной техники.

### Шахта вверх, за облака

Молибден и вольфрам — первые редкие металлы, освоенные промышленностью еще в прошлом веке. Теперь они, собственно, уже не считаются редкими и называются легирующими, поскольку свыше 90% их применяется в виде легирующих добавок в сталях и сплавах — жаропрочных, твердых, износостойких.

По своим физическим и химическим свойствам, а также основному направлению использования молибден и вольфрам — элементы-аналоги. Они падают друг под другом в таблице Менделеева, во второй подгруппе шестой группы. Но вот минералогическая судьба этих элементов сложилась совсем по-разному.

Главным промышленным минералом молибдена является его сульфид  $\text{MoS}_2$  — молибденит, или молибденовый блеск. Он очень похож на графит и оставляет такой

же след на бумаге. До середины XVIII в. их не различали. Лишь в 1758 г. шведский химик и минералог А. Ф. Кронстедт предположил, что это два разных вещества, а 20 лет спустя его соотечественник К. В. Шееле растворил молибденит в крепкой азотной кислоте, из которой выпал осадок окиси молибдена белого цвета.

Промышленные минералы вольфрама — соли вольфрамовой кислоты  $(Fe, Mn) WO_4$  — вольфрамит и  $CaWO_4$  — шеелит; последний получил свое имя в честь К. Шееле, который в 1781 г. выделил из него вольфрамовый ангидрид. Молибден часто присутствует в шеелите в виде изоморфной примеси, а молибденит сопровождает шеелит в скариновых месторождениях, возникающих при проникновении магмы в карбонатные породы.

Тырныаузское вольфрам-молибденовое месторождение расположено на Кавказе в Баксанском ущелье, в Приэльбрусье.

В 1915 г. при Российской Академии наук была организована Комиссия по изучению естественных производительных сил природы (КЕПС). Она пыталась выявить на территории России дефицитное сырье, в том числе очень дорогой и необходимый для производства пушек вольфрам.

Академик А. Е. Ферсман писал о работе этой комиссии: «...деятельность комиссии была исключительно стеснена средствами. Достаточно указать, что для такой исключительно важной проблемы, как проблема вольфрама, в течение трех лет Академия наук не смогла получить некоторых небольших кредитов. Специалисты по изучению Кавказа установили ряд интересных месторождений шеелито-вольфрамовой руды на северном склоне Кавказского хребта... Получив отказ для научной проверки этого открытия, академик А. Н. Крылов отдает свои личные сбережения в сумме 500 рублей для спасения нашей армии, оставшейся без снарядов».

С 1928 г. в Баксанское ущелье направлялись геолого-разведочные партии. В 1934 г. в районе Тырныауза студентка геологического факультета Новочеркасского политехнического института Вера Флерова обнаружила молибденовое месторождение. «...Милая мама!.. Пошла и я на съемку. И вот в осыпи пахожу — привыкла смотреть всегда в землю и присматриваться к каждому камешку — два кварцевых обломка с молибденидом. Вечером в этот же день приехал Борис. Он тоже подтвердил, что это молибденит... Хамид и Асхат пошли на розыски корен-

ного выхода молибденита и нашли его, Борис в восторге!»

Открытие Веры Флеровой и Бориса Орлова (ее мужа) имело огромное значение. В Тырныаузе в 1940 г. вступил в строй вольфрамо-молибденовый комбинат с обогащательной фабрикой.

Сам городок Тырныауз, где расположена обогащательная фабрика, вытянулся по берегу р. Баксан на отметке 1200 м над уровнем моря. От него к руднику мимо пика «Молибден», где Вера Флерова нашла первые рудопоявления, фуникулер по канатной дороге поднимает шахтеров к отметке 2004 м. Здесь находится откаточный штрек, который расположен под огромной скарновой подковой, находящейся внутри горы. Само месторождение — подковообразное тело скарна — прорезано стволами шахт, уходящих вверх от штрека.

Разорванное минными взрывами тело скарна ссыпается в вагонетки, которые подвозят руду к мельницам самоизмельчения. Это огромные барабаны диаметром 18 м. Они вращаются со скоростью, которая подобрана таким образом, что большие куски руды, поднявшись в верхнюю точку барабана, срываются вниз, раскалывая более мелкие куски, и раскалываются сами.

Измельченная руда вместе с водой по пульпопроводам, уложенным на склоне горы, течет на обогащательную фабрику — в цех флотации. Схема флотации рассчитана на комплексное извлечение всех полезных компонентов. Сначала в пульпу добавляется ксантогенат и терпинеол — всего по несколько десятков граммов на тонну руды. С помощью этих флотационных реагентов в пенный продукт извлекаются сульфиды молибдена (молибденит), меди и железа (халькопирит и пирит), а также висмутин, самородный висмут и немного золота. Коллективный сульфидный концентрат подвергается селективной флотации. После пропарки с известью флотация сульфидов меди и железа подавляется, добавляется несколько граммов керосина на тонну концентрата и флотируется молибденит. Молибденитовый концентрат переочищается во флотомашинах 6—7 раз, и в результате из руды получается 50%-ный концентрат.

Хвосты молибденовой флотации вновь флотируют, подавляя пирит. Медно-висмутовый концентрат отправляется на медеплавильный завод. Здесь его плавят в отражательной печи, из которой выходят: сернистый газ

(из него можно получить серную кислоту), шлак (пригодный для получения стройматериалов) и штейн (в него переходят все металлы). В конвертере штейн вновь плавят, переочищают и получают черновую медь, которую направляют на электролиз. В электролитической ванне анод из черновой меди растворяется и на катоде получают листы чистой меди, а из выпавшего на дно электролитической ванны шлама извлекаются висмут, золото и серебро.

Пиритный остаток также может быть переработан на серную кислоту и огарок, добавляемый в качестве железистой составляющей в цемент.

Хвосты сульфидной флотации содержат шеелит, кальцит, кварц и другие минералы пустой породы. В пульпу добавляют в качестве подавителя пустой породы жидкое стекло (обычный силикатный клей) и собиратель — смесь жирных кислот (олеиновой и др.) или мыл (растворимых натриевых солей жирных кислот). В пенный продукт поднимается в основном шеелит. Чтобы переочистить его и окончательно освободить от кальция, черновой концентрат пропаривают при температуре  $90^{\circ}\text{C}$  с жидким стеклом, а затем вновь флотируют мылами. В результате получают вольфрамовый концентрат с содержанием 40—65% трехоксида вольфрама и около 5% изоморфно вкрапленного в шеелит молибдена. Сюда же извлекается и несulfидный молибден в виде родственного шеелиту повеллита ( $\text{CaMoO}_4$ ).

Вольфрамо-молибденовый концентрат перевозят в Нальчик. Здесь на гидрометаллургическом заводе вольфрам и молибден выщелачивают содой в автоклавах. В раствор переходят растворимые  $\text{Na}_2\text{WO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ , а в твердом остатке — кеке — остается  $\text{CaCO}_3$ .

Растворы очищают от примесей железа, магния и др. Затем молибден осаждают сернистым натрием в виде трисульфида  $\text{MoS}_3$ . В раствор добавляется кислота, вольфрамат натрия превращается в вольфрамовую кислоту, которая после обжига представляет собой чистую трехокись вольфрама  $\text{WO}_3$ . Из этого продукта уже можно получать металлический вольфрам. Но большая часть концентрата используется как легирующая добавка в стали, при производстве твердых сплавов, карбида вольфрама и по другим назначениям.

На долгом и сложном пути извлечения естественных минералов из руд, превращения их в искусственные минералы и металлы возникает множество проблем.



Как извлечь из руды все ценное наиболее полно? Как утилизировать отходы? Как получить из бедных продуктов высококонцентрированные и чистые металлы с содержанием 99,99% (четыре девятки, как говорят металлурги). Как извлечь сопутствующие рассеянные элементы, концентрирующиеся в растворах, пылях и газах металлургического производства: например, рений, сопутствующий молибдену; селен и теллур, сопутствующие сульфидам меди, и т. д.? По сравнению с этими труднейшими проблемами поиск иголки в стоге сена представляется элементарной школьной задачей. Тем более что концентрация иголки в стоге сена даже выше, чем концентрация некоторых редких элементов в рудах (граммы и доли грамма на тонну). Любой обогатитель скажет, что нужно просто пропустить стог сена через магнитный сепаратор. Вот и все.

### Изумруд и его бедный родственник

Еще в начале XX в. в справочниках и энциклопедиях о бериллии как химическом элементе говорилось, что практического значения он не имеет. Другое дело драгоценные бериллы, имеющие, как и промышленный, одну и ту же формулу  $\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$ . Изумруд (его древнее название «смарагд») имеет незначительные примеси хрома, ванадия и двухвалентного железа. Но по красоте и ценности зеленоватые крупные кристаллы массой более 5 карат соперничают с бриллиантами. Аквамарин (в переводе с латинского — «морская вода») обязан своим цветом примесям железа, а эффекту «кошачьего глаза» — тончайшим полым канальцам в кристалле. Он издавна считался амулетом моряков. Не менее прекрасны розовый воробьевит с примесями соединений церия, рубидия и двухвалентного марганца и золотисто-желтый гелиодор, окрашенный ионами трехвалентного железа.

Наиболее интересен в семье берилловых самоцветов зеленый хризоберилл и его загадочная разновидность — александрит. Александрит — камень-хамелеон, о котором говорят, что «утро у него зеленое, а вечер красный», и в самом деле — густо-зеленый днем и кроваво-красный при искусственном освещении.

Изумруд в отличие от других зеленых камней сохраняет свою окраску при искусственном освещении. С ним связано множество суеверий: благотворно действует на глаза (действительно, зеленый цвет успокаивает глаз), ослепляет змей и т. п.

Более 3000 лет назад месторождения изумрудов разрабатывались в темных слюдястых сланцах Аравийской пустыни. Для их добычи на побережье Красного моря уже тогда египтянами были пройдены сотни шахт глубиной свыше 200 м. Изумруды античного времени происходили из так называемых копей Клеопатры в Верхнем Египте. Копи были заброшены и забыты, но в XIX в. открыты снова. Однако разработка их вскоре прекратилась, так как по качеству изумрудов они сильно уступали колумбийским.

Во времена инков в джунглях на территории нынешней Колумбии полуголые индейцы каменными топорами и мотыгами рыхлили черные известняки, выбирая яркие прозрачные изумруды, столь восхитившие алчных конкистадоров.

Появление южноамериканских изумрудов в Европе вызвало сенсацию, так как по сравнению с тогда известными они были неправдоподобно больших размеров и густоты окраски. Самыми выдающимися были пять камней, которые Ф. Кортес подарил своей невесте, племяннице герцога Бехарского. Этим он смертельно обидел королеву Испании Изабеллу. Как знать, не эта ли обида была причиной утери драгоценных камней и гибели Кортеса, потерпевшего кораблекрушение в 1547 г. на пути к Алжиру, куда он шел на помощь королю Испании и императору Германии Карлу V, которые вели осаду цитадели средиземноморских пиратов.

Когда испанцы захватили изумруды, которые коренные жители страны собирали в своих храмах, они стали искать источник этих чудес природы и в конце концов в 1558 г. случайно натолкнулись на копи в части страны, сейчас называющейся Колумбией; эти копи с того времени почти непрерывно разрабатываются. Весьма вероятно, что были обнаружены не все копи, разрабатывавшиеся местными жителями.

Индейцы племени чибча-муиски оказали конкистадорам упорное сопротивление. Особенно жаркие бои шли на подступах к соляным копиям Синакиры и изумрудным рудникам Мусо — главным сокровищницам индейцев. Захваченные в плен, они предпочитали умереть под пытками, но не выдавали тайны, где находятся изумрудные копи.

Испанцам помог случай. После сокрушительного поражения у подножия горы Итоко, что совсем рядом с Мусо, завоеватели отступали через густые тропические

заросли. Лейтенант Хуан де Пенагос склонился к ручью омочить лицо, утолить жажду и увидел зеленые кристаллы.

С тех пор утекло много воды, но изумруды по-прежнему являются одной из основ колумбийской экономики. Это второй по значению экспортный товар республики после кофе. С 1970 по 1983 г. из Колумбии вывезено свыше 10 млн карат этих драгоценных камней, валютные поступления составили 330 млн долл. По мнению экспертов, стоимость покидающих страну зеленых кристаллов можно удвоить: таковы масштабы контрабандных сделок.

В 120 км к северо-северо-западу от Боготы, столицы Колумбии, изумруды в ассоциации с кварцем, доломитом и пиритом встречаются в кальцитовых жилах, секущих битуминозные известняки мелового возраста. Ранее испанцы вели разработку штольнями, которые проходили в склонах холмов через пустые породы до контакта с жилами, содержащими драгоценные камни. В настоящее время применяются открытые разработки. Для ведения работ требуется большое количество воды, которую накапливают в специальных резервуарах и в должное время выпускают, позволяя ей смывать обломки пустой породы, оставляя обнаженными горные породы, содержащие изумруды.

Надежда на обогащение манит бедняков, разного рода авантюристов и гангстеров. В Колумбии их называют «гуакерос», от индейского слова «гуака» — «потайное сокровище». Но есть у него и другое значение — «погребение». Тысячи «гуакерос» остались в безымянных могилах, засыпанные обвалами на коварных горных склонах, сраженные бандитской пулей или ударом мачете.

На антрацитово-черном бугристом ложе долины, которое резко контрастирует с яркой зеленью окружающих гор, стоят растянутые на жердях навесы из циновок, чуть-чуть защищающие от солнца. Несколько сот людей вгрызаются в землю лопатами, стоя по колено в воде в неглубоких траншеях, размывая их склоны водой из шлангов. Работают целыми семьями: много женщин, подростков.

Сложность образования изумрудов и в значительной степени их редкость обусловлены тем, что этот минерал представляет собой берилл, окрашенный хромом. Геохимически это совершенно необычное сочетание; бериллий и его минералы обычно теснейшим образом ассоци-

ируют с кислыми магмами и горными породами, связанными с этими магмами, — гранитами, гранодиоритами и их жильными производными, но хрома и хромовых соединений в гранитоидах, как правило, совершенно нет. Хром — весьма характерный элемент, приуроченный к ультраосновным породам.

Изумруд образуется тогда, когда жильные производные кислой магмы, обогащенные бериллием, внедряются в ультрабазиты. При этом происходят контактовые взаимодействия вмещающей породы и внедрившейся магматической жилы. Вокруг жилы формируется оторочка слюдяной породы, в составе которой участвуют вещества обеих контактирующих пород. Кристаллизующийся в этой зоне берилл поглощает хром и окрашивается в яркий зеленый цвет. Берилл, кристаллизующийся здесь же, но не в слюдитах, а в пределах гранитоидного жильного материала, не содержит хрома и не имеет изумрудной окраски.

Контактовая природа изумрудных месторождений была установлена в начале 20-х годов академиком А. Е. Ферсманом при изучении им изумрудных копей Урала. Исследование старинных египетских месторождений показало, что они принадлежат к тому же уральскому типу.

Берилл в виде обычных дефектных кристаллов, непригодных для ювелирных изделий, распространен довольно широко, драгоценные же выделения этого минерала крайне редки. Причиной является то, что драгоценными разностями являются кристаллы, образовавшиеся в идеальных условиях, при которых росту кристалла ничто не мешало, он шел в достаточно постоянных условиях и относительно медленно. Необходимо, чтобы кристалл мог спокойно наращивать слой за слоем без каких-либо дефектов и без изменения состава, а также без захвата растворов и каких-либо других кристаллов, образующихся в том же растворе. Иначе говоря, для получения драгоценного кристалла должны существовать условия «свободного роста» в какой-либо полости — кристаллизаторе. В природе таким кристаллизатором для многих минералов являются полости пегматитовых жил.

В последние этапы кристаллизации в полости из охлажденного водного раствора выпадают все вещества, бывшие ранее компонентами водного флюида. В таких остаточных полостях за счет фтора кристаллизуется топаз, а за счет окиси бериллия — берилл. Состав этих

минералов содержит широко распространенные в гранитах окислы — кремнезем, глинозем, необходимые для построения обоих упомянутых минералов. Если во флюиде содержались бор и редкие щелочи, в частности литий, то за их счет образуются турмалин в прекрасных розовых и зеленых кристаллах и маложелезистая литиевая слюда. Железосодержащие минералы выпадают из значительно более горячих растворов; и железистый турмалин — шерл, и железистая литиевая слюда — циннвальдит выпадают на ранних этапах кристаллизации и поэтому не дают совершенных драгоценных кристаллов.

Помимо драгоценных минералов, в пегматитовых жилах в исключительно редких условиях, когда возможна совершенная кристаллизация с участием водных флюидов и растворенных в них веществ, формируются кристаллы многих минералов, представляющие гордость минералогических музеев.

На территории СССР еще до нашей эры страна гипербореев славилась богатством самоцветов, отправлявшихся через Крым в Малую Азию, Грецию и Рим. Древние греческие и римские ученые повествовали о сказочных камнях из неведомых Рифейских гор, как называли в те времена Урал. По-видимому, именно об уральских изумрудах и аквамаринах говорит Плиний, сообщая в 70-х годах н. э. о «знатнейших смарагдах скифов».

В 1830 г. к Якову Каковину, возглавлявшему Екатеринбургскую гранильную фабрику, явился безвестный смолокур по фамилии Кожевников и показал найденные под вывороченным пнем, как он считал, «худые аквамарины». Каковин, сын крепостного, проявил незаурядные способности в камнерезном деле, был отпущен на волю, создал несколько замечательных ваз, ныне хранящихся в Эрмитаже. В «худых аквамаринах» он узнал ... изумруды. Вскоре во всем мире заговорили об открытии месторождения на Урале.

Этого человека, известного своей честностью и неподкупностью, влиятельный вельможа и коллекционер Л. Перовский обвинил в краже уникального камня «весом в фунт», о котором писали: «Едва ли не превосходящий достоинством изумруд, бывший в короне Юлия Цезаря». Карьера Каковина на этом оборвалась, сам он вскоре умер в безвестности, а пропавший изумруд так и не был найден. Спустя столетие академик Ферсман рассказал о том, как был найден уникальный «изумруд Каковина», самый большой из добытых в нашей стране,

ныне хранящийся в Минералогическом музее АН СССР. Каковин был намеренно оклеветан и отправлен в тюрьму по навету алчного вельможи Перовского, который судя по всему, и присвоил драгоценную реликвию.

А уральские изумруды не иссякли. В Алмазный фонд СССР в 1978 г. поступил изумруд «Славный уральский» массой 3362,5 карат.

В скифских могильниках и гробницах египетских фараонов, в глубоких подземных мраморных залах могил императоров династии Мин, расположенных близ Пекина, находили шестигранные кристаллы травянисто-зеленого изумруда. Римский император Нерон развлекался, глядя через отшлифованный прозрачный изумруд на бои гладиаторов. С особо крупными изумрудами, так же как и с крупными алмазами, были связаны многочисленные преступления. Молва наделяла их всевозможными чудесными свойствами, так образно воспетыми Куприным в повести «Суламифь».

Мечта получить изумруд в лабораторных условиях владела многими исследователями. Но уже научились выращивать в пламени горелок рубины, уже был синтезирован и сам «неодолимый» — алмаз. А изумруд все не поддавался.

Успех пришел к младшему научному сотруднику Института геологии, геохимии и геофизики Сибирского отделения Академии наук СССР Г. В. Букину, работавшему в лаборатории А. А. Годовикова.

Искусственные изумруды получают при очень высоком давлении — 150 тыс. атмосфер и температуре 1550° С. По внешнему виду они полностью имитируют природные. Для их диагностики применяются современные инструментальные методы — инфракрасная спектроскопия, электронный парамагнитный резонанс и другие, позволяющие определить примесные центры в кристаллах. Эти методы и помогли определить температуру, давление и концентрацию хрома и ванадия, при которых синтезируется изумруд.

Синтетические изумруды и александриты — не только ювелирные камни. Они оказались незаменимыми в квантовой электронике, нелинейной оптике. Изумруд используется в СВЧ-усилителях, резонаторных лазерах, работающих в диапазоне 3 см, а также для лазеров бегущей волны, применяемых в астрономических исследованиях. Выращивают кристаллы размером до 120 мм с заданными оптическими характеристиками.

Однако практическое значение и ценность бериллов не ограничиваются драгоценными кристаллами. Призматические шестигранные кристаллы бериллов прозрачны или полупрозрачны, хорошо образованы и имеют размеры от микроскопических до нескольких метров. Как силикатный минерал, берилл растворяется только в плавиковой кислоте. К сожалению, несмотря на высокую твердость, все бериллы очень хрупкие.

В современной технике большую ценность приобрел непрозрачный берилл, скромный брат роскошных самоцветов, важнейшее сырье для получения металла — бериллия.

В 1798 г. при химическом анализе изумруда и берилла французский химик Л. Воклен открыл окисел нового, ранее неизвестного элемента, который по имени минерала был назван им «берилловой землей» (землями тогда называли окислы металлов). Год спустя новому элементу было дано название «глюциний» из-за сладкого вкуса его солей (от греч. «глюкос» — сладкий). Новое название, однако, не получило широкого распространения и ныне сохранилось только во Франции. Лишь через тридцать лет после открытия элемента ученым удалось получить металлический бериллий в виде порошка.

Это один из наиболее легких металлов. Он в полтора раза легче алюминия и в четыре раза — нержавеющей стали. Ценнейшее свойство бериллия — жаростойкость, позволяющая использовать изделия из него при высоких температурах. Этим свойством обладают и его многочисленные сплавы. Незначительная добавка бериллия к некоторым металлам резко улучшает их механические свойства. Сплавы его используются для производства деталей и конструкций, подвергающихся длительному интенсивному напряжению или трению при нормальной и высокой температуре. Особой известностью пользуются бериллиево-медные бронзы, содержащие всего 1—5% бериллия. Механические свойства (прочность, твердость и т. д.) бериллиевых бронз уникальны. Замечательная особенность их — увеличение в несколько раз твердости и прочности сплавов при высоких температурах. Бериллий находит применение в сплавах с алюминием, магнием и другими металлами, придавая им вязкость, жаростойкость, легкость и устойчивость к коррозии. Легкие и прочные бериллиево-алюминиевые сплавы — весьма перспективный материал для ракетостроения и космической техники.

Атомная структура бериллия позволяет использовать его и в атомных реакторах в качестве замедлителя нейтронов. Он может выполнять и роль отражателя нейтронов, он радиационно стоек при высоких температурах. На этих свойствах основано применение бериллия в атомных реакторах морских судов и самолетов, в теплозащитных конструкциях космических кораблей и ракет.

До 1939 г. мировое производство бериллия и его солей не достигало и 10 т в год. Однако с началом второй мировой войны интерес к бериллию резко повысился. Потребление бериллия воюющими странами увеличилось в пять раз. Началась погоня за источниками дефицитного бериллиевого сырья.

Соединенные Штаты Америки, не считаясь с затратами, вывозили берилловые концентраты из Бразилии и Южной Африки на самолетах. Гитлеровцы, отрезанные от источников сырья, пытались использовать нейтральную Швейцарию для контрабандного ввоза бериллиевой бронзы: от швейцарских «часовщиков» американским фирмам поступил заказ на такое количество бериллиевой бронзы, которого хватило бы на пружины для часов всему человечеству лет на пятьсот вперед. Хитрость была разгадана, однако пружины из бериллиевой бронзы время от времени появлялись в новейших марках авиационных скорострельных пулеметов, поступавших на вооружение фашистской армии.

В послевоенные годы интерес к бериллию еще более увеличился. Причиной явилось открытие свойств сверхчистого металлического бериллия, позволяющих применять его в атомных реакторах.

Источниками берилла служат в основном гранитные пегматиты, крупные жилы которых известны во многих районах земного шара. Пегматиты возникают при кристаллизации последних порций гранитных расплавов. В условиях высоких давлений из расплавов, проникших в трещины горных пород, медленно образовывались огромные кристаллы полевых шпатов, достигающие нескольких метров в поперечнике, сплошные массы кварца, крупные кристаллы светлой слюды и разнообразные минералы редких элементов, в том числе и берилл. Отдельные его кристаллы, росшие в пустотах, наполненных газоводным высокотемпературным раствором, приобретали качество первоклассных драгоценных камней. Кристаллы берилла в пегматитах отличаются крупными размерами. Обычно они бывают до 5 см в поперечнике при



длине в 10—15 см. Нередки и кристаллы-гиганты, масса которых достигает десятков, сотен и даже тысяч килограммов. Наиболее крупный из известных кристаллов берилла достигал 9 м в длину и 1,5 м в поперечнике.

Кристаллы берилла распределены в пегматитах исключительно неравномерно. Часто, обнаружив гнездо кристаллов массой до тонны, рудокопы затем в течение многих дней безуспешно «вгрызаются» взрывчаткой в плотную породу, пока не наткнутся на новое гнездо или крупный кристалл. В Африке или Бразилии еще недавно тысячи местных жителей за гроши перерабатывали огромные объемы породы, выскивая шестигранные кристаллы берилла. Так кустарным способом ежегодно добывалось несколько тысяч тонн бериллиевого концентрата.

Поиски бериллия привели к открытию месторождений нового типа. По своим химическим свойствам бериллий — типичный амфотерный элемент. Его особенность — способность к образованию «комплексных» соединений; в них амфотер вступает в прочную связь с кислотным анионом, образуя комплексный ион. Геохимик А. А. Беус предположил, что бериллий может переноситься в природных растворах в составе комплексных соединений и выделяться из растворов в результате их взаимодействия с определенными горными породами. Задача поисков месторождений бериллия новых типов облегчалась тем, что академик Д. С. Коржинский и его школа длительное время изучали аналогичные геологические и геохимические особенности горных пород, первичный состав которых был изменен под влиянием глубинных растворов и с которыми уже ранее была известна связь месторождений других редких элементов — вольфрама и олова.

Огненные ведущее место в сырьевом балансе бериллия в мире занимают так называемые пневматогидротермальные месторождения, образованные в результате взаимодействия высокотемпературных паров и растворов («пневма» — в переводе с греческого означает газ, «гидро» — водный, «терма» — тепло) с определенными типами горных пород. В подобных месторождениях накапливаются огромные массы бериллия, измеряемые десятками тысяч тонн. Концентрация металла в рудах этих месторождений значительно выше, чем в пегматитах. Часто они сопровождаются значительными скоплениями минералов фтора, которые сами по себе имеют промышленную ценность и, кроме того, выполняют роль «поискового признака» на бериллий.

Промышленное освоение новых месторождений столкнулось с рядом трудностей. Минералы бериллия, которые в пегматитах легко отбирались вручную, здесь оказались весьма мелки (обычно доли миллиметра), что потребовало разработки специальных методов их обогащения.

Первичное обогащение бериллийсодержащих руд основано на уникальной способности ядер бериллия испускать нейтроны при облучении  $\gamma$ -лучами низкой энергии. Фотонейтронный метод сортировки позволяет выделить черновой концентрат из относительно бедной руды. Теперь он полностью вытеснил ручную сортировку.

Берилл — силикатный минерал, не обладающий ни магнитными свойствами, ни высокой плотностью, ни природной гидрофобностью. Растворяется он также в весьма специфических условиях. Тем не менее обогащение руд берилла возможно. Например, высокая твердость берилла и хризоберилла позволяет применять избирательное измельчение при наличии в руде мягких пород: слюдистых сланцев, талька, глины.

Чтобы извлечь берилл, сначала флотируют слюды катионным собирателем. Затем пульпу промывают для удаления катионов, воду смягчают, обрабатывают руду плавиковой кислотой (кислотная схема) или едким натром (щелочная схема) и флотируют берилл жирными кислотами (олеиновой и др.). Плавиковая кислота, как и едкий натр, является активатором флотации берилла; их действие связано с частичным растворением на поверхности минерала кремнекислородных колец ( $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ), благодаря чему в кристаллической решетке минерала обнажаются катионы бериллия. Кварц и полевой шпат при этом остаются без изменений и не флотируют.

Попавшие в берилловый флотационный концентрат турмалин и гранат отделяют магнитной сепарацией. Окончательную очистку от примесей производят гидрометаллургическим методом: выщелачиванием и обжигом при высокой температуре. Промышленное значение приобрели и другие минералы бериллия: берtrandит, фенакит, барилит, которые также являются силикатами.

Комплексная переработка пегматитовых и пневматогидротермальных руд, являющихся, как правило, редкометалльными, предусматривает извлечение тантала, ниобия, лития, слюды, полевых шпатов, турмалина, касситерита.

Следует заметить, что бериллий является одним из самых токсичных элементов, вызывающих легочные заболевания, рак и специфическое заболевание — бериллез.

## Красный минерал белого металла

Титан — самый распространенный среди бывших редких металлов. Его содержание в земной коре 0,63%, т. е. больше, чем меди, цинка, свинца, никеля, олова, вольфрама, молибдена, ртути, висмута и еще дюжины цветных металлов, вместе взятых. Первый титановый минерал — известный с древности рутил назван в соответствии со своим цветом (от лат. *rutilus* — красный). Это полудрагоценный, полупрозрачный камень, отличающийся большой величиной двупреломления света, имеющий высокую твердость, а по химическому составу представляющий собой двуокись титана  $\text{TiO}_2$ .

Титан был открыт в 1791 г. английским химиком и минералогом У. Грегором в минерале менаканите (известном теперь как ильменит —  $\text{FeTiO}_3$ ) и был им назван менакитом. Но в 1795 г., когда немецкий химик Мартин Клапарт вторично открыл элемент — на этот раз в рутиле, — он сменил его на громкое, ко многому обязывающее имя «титан».

Происхождение этого названия одни связывают с большой распространенностью элемента в земной коре — в греческой мифологии титанами именовались дети Геи (Земли), другие считают, что Клапарт дал имя элементу в честь Титании — фантастической царицы эльфов из германской мифологии.

Выделение чистого титана из его соединений оказалось поистине титанической задачей. Это пытались сделать многие известные химики прошлого века (Либих, Берцелиус, Вёлер). Однако они получали недостаточно чистый титан, а поначалу лишь его соединения. В таком виде титан явно не оправдывал своего гордого названия: он считался хрупким, непрочным, непригодным для изготовления конструкций.

Двуокись титана применялась (и применяется сейчас) для изготовления белил, оказавшихся значительно лучше свинцовых и цинковых. Титановые белила неядовиты, обладают большей отражательной способностью и не темнеют под действием сероводорода.

В 1910 г. американскому химику Хантеру удалось получить несколько граммов сравнительно чистого металла, содержащего лишь 0,1% примесей. Когда были разработаны способы, позволяющие получать титан очень высокой чистоты, этот металл начал изумлять человека своими чудесными свойствами. Оказалось, например, что

титан, будучи вдвое легче железа, по прочности превосходит многие стали. Даже алюминий, завоевавший себе репутацию «крылатого», не выдерживает конкуренции с титаном: ведь он лишь в полтора раза тяжелее алюминия, но зато в шесть раз прочнее. Только благодаря титану масса самолета может быть снижена на несколько тонн. Кроме того, титан сохраняет прочность при высоких температурах. Поэтому самолет для сверхзвуковых скоростей был впервые изготовлен из титана.

Не менее замечательным свойством титана является необычайно высокая устойчивость против коррозии — извечного врага металлов. На пластинке из этого металла за 10 лет пребывания в морской воде не появилось и следа ржавчины (от железной пластинки за такой срок остались бы одни воспоминания). Это свойство открывает ему широкие возможности для использования в судостроении и гидротехнике.

Высокая кислотоупорность делает титан прекрасным материалом для изготовления узлов и деталей химической аппаратуры. Он может найти широкое применение в медицине (для изготовления инструментов, протезов), военной технике (такая броня вдвое легче стальной), автомобилестроении, пищевой промышленности.

К сожалению, у титана есть и существенный недостаток — очень высокая цена. Собственно, это «порок» не врожденный, он обусловлен лишь чрезвычайной трудностью извлечения его из руд. После длинного и сложного технологического пути, который преодолевает титан в процессе превращения из концентрата в готовую продукцию — лист металла, стоимость его возрастает в 500—600 раз!

Металлический титан начал применяться только в конце 40-х годов. Несмотря на пока еще высокую цену, спрос на этот металл возрастает с каждым годом. Замена им дешевых материалов во многих случаях оказывается экономически выгодной, поскольку срок службы химического реактора из титана в десятки раз больше, чем из стали. Из титановых сплавов делают лопасти вертолетов, рули поворота и другие ответственные детали авиационной техники.

В природе известно более 70 минералов титана, но важнейшие из них — рутил и ильменит. Они встречаются в прибрежных россыпях, которые на десятки километров тянутся вдоль береговой линии в Индии, Канаде, Норвегии, США, Индонезии, Японии, СССР. Минер-

ралы титана встречаются и в коренных месторождениях, а также сопутствуют апатиту, магнетиту, касситериту, редким металлам — танталу, ниобию, бериллию и др.

Минералы титана, как правило, имеют высокую плотность — более  $4,5 \text{ г/см}^3$  — и могут извлекаться гравитационными методами. Первая стадия обогащения — получение коллективного концентрата тяжелых (шлиховых) минералов. В этот концентрат, кроме титановых минералов, попадают циркон, магнетит, монацит (минерал редкоземельных элементов), касситерит, золото, хлорит, гранат, турмалин и др. Разработка месторождений ведется скреперами и драгами.

Коллективный концентрат в зависимости от соотношения попавших в него минералов разделяется магнитной или электрической сепарацией. Ильменит обладает магнитными свойствами и выделяется в поле высокой интенсивности вслед за магнетитом, который извлекается слабомagnetным полем.

Все большее значение приобретает флотация тонко-экрапленных титановых минералов из комплексных руд. Новый реагент (ИМ-50), представляющий собой смесь гидроксамовых кислот, является селективным собирателем титановых минералов.

Химическая переработка титановых концентратов производится по сложной технологии. Вначале из  $\text{TiO}_2$  путем хлорирования в присутствии восстановителя при температуре  $800\text{--}1250^\circ\text{C}$  получают  $\text{TiCl}_4$ . Его очищают от примесей и получают жидкий четыреххлористый титан. В стальных реакторах при  $900^\circ\text{C}$  металлическим магнием или натрием восстанавливают  $\text{TiCl}_4$  до титановой губки. Хлориды и магний отгоняют в вакууме и получают металлический титан. Эта трудоемкая, дорогая и сложная технология постепенно совершенствуется. Считается, что XXI век распространится в значительной степени с железом и машиностроение перейдет на создание алюминий-титановой подвижной техники, легкой и нержавеющей, экономичной, с большим безремонтным ресурсом. Это будут легкие автомобили, сельхозтехника, вагоны, нержавеющие суда большой грузоподъемности.

Переход промышленности на сплавы из легких прочных металлов заметно расширит сырьевую базу. Ведь титан, алюминий, магний и другие металлы можно получать из бедных и сложных по составу руд, отходов производства, идущих ныне в отвалы. Это дает возможность применить экологически чистые технологии.

## Камни плодородия

Почва живет своеобразной жизнью, где химические процессы неживой природы так переплетаются с жизнью организмов, что отделить их друг от друга представляется совершенно невозможным.

*А. Е. Ферсман*

### «Элемент жизни и мысли»

Так назвал фосфор академик А. Е. Ферсман. Фосфор содержится не только во всех органах зеленых растений, главным образом в плодах и семенах, но и в животных, их костях, мышцах, нервных тканях. В теле человека содержится в среднем 1,5 кг фосфора, в том числе 12 г в нервах и мозге. Успех земледелия, судьба урожая во многом зависят от количества фосфорсодержащих удобрений. Добыча фосфатных руд в мире перевалила за 100 млн т в год.

Хотя фосфор входит в состав 190 минералов, его получают в основном из двух: апатита  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$  и фосфорита  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ .

Апатит — минерал магматического происхождения, образцы его разнообразны: от мелкокристаллических зернистых скоплений до прекрасно образованных больших кристаллов. Цвет апатита желтый, зеленый, голубой, коричневый, фиолетовый, белый. Кристаллы апатита напоминают то берилл, то кварц, иногда это радиально-лучистые шары или плотные массы, неотличимые от простого известняка. Он бывает тусклым и блестящим, прозрачным и непрозрачным. Минерал то прячется мелкими вкраплениями среди других пород, то образует целые залежи и даже горы, как в хибинских тундрах, где расположено самое крупное в мире месторождение апатита. За свое непостоянство апатит и получил название, которое в переводе с греческого означает «обманщик».

На Кольском полуострове на краю Хибин находится гора с широкой плоской вершиной. Круглый год открыта она полярным ветрам, окутана низкими облаками. Это суровое, поднявшееся на тысячеметровую высоту плато Расвумчорр. Летом 1923 г. на его склонах экспедиция академика А. Е. Ферсмана обнаружила голубовато-зеленые камни дотоле неизвестной фосфатной руды. Это были апатиты.

В «Занимательной минералогии» А. Е. Ферсман писал об этом месторождении: «...зеленый искристый апатит с

серым нефелином образуют сплошную стену в 100 м. На 25 км протягивается этот замечательный пояс хибинских тундр, огибая их кольцом. Исследования показали, что апатитовая руда уходит в глубину даже ниже поверхности океана, и около двух миллиардов тонн этих ценнейших ископаемых накоплено здесь в Хибинах, не имея себе равных нигде в мире».

Великий геолог оказался не совсем точен. Запасы апатита оказались здесь в несколько раз больше. Уже в годы второй пятилетки здесь были построены комбинат «Апатит», город Кировск, а Кировская железная дорога от Ленинграда до Мурманска прошла через станцию «Апатиты».

Первой была освоена гора Кукисвумчорр. Вначале апатит без обогащения грузили в вагоны и отправляли на химические заводы для производства фосфорных удобрений, а также через Мурманск в Германию, Англию и Америку. Но вскоре в Кировске (тогда Хибиногорске) была построена флотационная обогатительная фабрика, по тем временам одна из самых крупных в мире, дававшая 1 млн т апатитового концентрата в год.

Апатит по природе своей очень легкофлотируемый минерал. Жирные кислоты и мыла, вступая в реакцию с ионами кальция, находящимися на поверхности, образуют гидрофобное покрытие, а флотация нефелина и других силикатов подавляется жидким стеклом в щелочной среде. В качестве жирно-кислотного собирателя применяется талловое масло, являющееся отходом целлюлозно-бумажной промышленности, предприятия которой расположены здесь же, на Кольском полуострове.

В результате флотации в концентрат из руды извлекается около 95% фосфора, причем в виде почти чистого апатита: кондиционное содержание  $P_2O_5$  в концентрате — 39,4%, а в апатите его содержание составляет 41–42%.

Прошли десятилетия. Неиссякаемая, казалось бы, гора апатита стала понемногу беднеть. Были введены в действие новые рудники и вторая обогатительная фабрика, в несколько раз больше первой. В июне 1964 г. был введен в строй рудник на плато Расвумчорр.

Почти на самую поверхность плато выходят огромные залежи апатитовой руды. Казалось, вот оно, прямо под ногами, грузи на самосвалы и отправляй на обогатительные фабрики. Но природа ревниво хранит свои богатства, она поставила на пути к ним снежные запо-

сы, крутые каменистые обрывы, густые завесы туманов. Питьевую воду сюда тоже приходится привозить. На плато Расвумчорр лета не бывает. 260 дней в году — зима с тридцатиградусными морозами, пургой и 100 дней — холодная, дождливая осень. Было решено провести из долины внутрь непокорной горы железнодорожный туннель, а сверху пробить ее насквозь и сбрасывать апатит через эти гигантские трубы-рудоспуски вниз, прямо в вагоны. На плато подняли и смонтировали экскаваторы.

На плато можно добраться только на вездеходах, да и то не всегда. Таким же способом сначала перевозили людей и на самом руднике. От общежития, где отдыхают рабочие, до копра над рудоспуском не больше двух километров. Но были дни, когда смеи проходчиков преодолевали это расстояние сквозь пургу и заносы три часа... Теперь здесь построен подземный ствол, в котором смонтированы лифты. Высота подъема — 200 этажей жилого дома.

Вронеь с землей — бетонное кольцо шести метров в диаметре. Ствол рудоспуска уходит вниз почти на 600 м — это высота двух Эйфелевых башен, поставленных одна на другую. Сброшенная сюда руда скапливается внизу, в устье ствола. Затем по двум ответвлениям через люки с пневматическими затворами она поступает в вагоны-самосвалы. Одновременно могут загружаться сразу два вагона, стоящие в туннеле на параллельных путях.

Разработка месторождения расширяется. Проектируется не только увеличение добычи апатита, но и комплексная переработка всей руды.

В 1956 г. с фабрики № 1 на Волховский алюминиевый завод стал поступать нефелиновый концентрат, где из него получали алюминий, поташ, соду, известь, цемент, галлий. Но сейчас, когда работает фабрика № 2, нефелина производится в 10 раз больше. Перерабатывать его негде, и он складывается в отвал — гигантское хвостохранилище на берегу озера Имандра, загрязняя жемчужину Заполярья.

Кроме нефелина, в хвостах апатитовой флотации есть еще несколько ценных минералов: титаномagnetит и сфен (титаносодержащие), эгирин, полевой шпат и другие. В самом апатите содержатся редкие земли.

Фосфор содержится и в фосфоритах — осадочных горных породах, состоящих из тонкозернистого апатита,



частично разложившегося (вторичного фосфатного вещества), а также известняка, песчаника, глины, окислов железа и т. д. В некоторых месторождениях фосфатные вещества являются цементирующей связкой различных минералов, образующих «желваки».

В Южном Казахстане расположено уникальное месторождение фосфоритов — знаменитый горный хребет Каратау, по-русски — Черные горы. Такими они и были тысячи лет — мрачными, голыми, дикими. Но вот геологи нашли в недрах огромную кладовую фосфоритной руды. А «фосфор» — значит несущий свет. Здесь хранится более 1,5 млрд т руды, из которой можно вырабатывать удобрения.

Мощные залежи и выход пластов непосредственно на поверхность определяют условия разработки, добычу руды наиболее дешевым, открытым способом.

Ступенчатые откосы карьера на солнце горят всеми цветами радуги. Но это — пустые породы. А под ними — скромный, темно-серый в прожилках камень — фосфорит.

Месторождение расположено в исключительно благоприятных географических и экономических условиях, идеально отвечает требованиям рационального размещения промышленности минеральных удобрений. Недалеко от Каратау раскинулись целинные земли Казахстана и Сибири, хлопковые поля Средней Азии.

Основная часть фосфоритов Каратау перерабатывается электротермическим способом. Применение его решило проблему удовлетворения возросших потребностей народного хозяйства не только в фосфорных удобрениях, но и в солях высокой чистоты, элементарном фосфоре и синтетических заменителях животного и растительного жира, в моющих средствах.

Фосфоритовая мелочь поступает на обогатительную фабрику и перерабатывается методом флотации. В качестве собирателей применяются отходы нефтеперегонки — карбоновые кислоты и их масла, торфяная смола, талловое масло. Растворимые соли кальция и магния отмываются, а карбонат магния — доломит — флотируется в присутствии добавок фосфорной кислоты которая депрессирует фосфатные минералы.

Цементирующие свойства фосфатов используются в промышленности стройматериалов.

На Чимкентском заводе пустили в дело даже шлаки от плавки фосфоритов. Они используются в качестве до-

бавок при помоле цемента. Из таких же шлаков Джамбулского фосфорного завода готовит строительные материалы Чимкентский комбинат асбестоцементных конструкций. Найден способ переработки шлаков в облицовочный материал.

### Удобрения из древнего океана

В океанской воде содержится около 35 г/л солей, в основном хлоридов, сульфидов и карбонатов натрия, калия, магния и кальция.

Объем воды в морях и океанах составляет около 1,37 млрд км<sup>3</sup>, и в ней свыше 20 млрд т различных солей. Ими можно покрыть всю поверхность земного шара слоем толщиной более 42 м. Процесс отложения морских солей при обмелении морских бассейнов происходил всегда, но наиболее интенсивное соленакопление было в пермский и третичный периоды.

Интенсивному испарению морской воды и образованию солевых отложений способствует отчленение от моря отдельных бассейнов и озер, сохраняющих при этом связь с морем через проливы. По мере испарения морской воды и выпадения солей бассейн пополняется водой из моря. Этот процесс может происходить периодически, обуславливая чередование солевых пластов. При испарении вначале кристаллизуются менее растворимые соли — карбонаты кальция и магния, затем сульфаты кальция и далее хлориды и сульфаты натрия, калия и магния. В конечной стадии испарения из концентрированных рассолов выделяются борно-кислые, литиевые и другие соли.

Наиболее мощные залежи калийных солей образовались в процессе отступления моря, существовавшего в древний пермский период. Пермское море простиралось от Северного Ледовитого океана до Каспийского моря и южнее, занимало огромную территорию европейской части нашей страны. В настоящее время на этой территории выявлены две зоны отложений калийно-магниевых и других солей: северная в районе Перми (Соликамское месторождение) и южная — в Южном Приуралье, Прикаспии и Поволжье.

Калийные залежи северной зоны состоят лишь из хлоридов калия, магния и натрия в виде сильвина, карналлита и каменной соли. В соляных отложениях южного бассейна присутствуют наряду с этими солями и сульфаты: полигалит, каинит, кизерит, которых нет в Соликамском калийном месторождении.

Залегание солевых отложений в южной зоне значительно сложнее, чем в районе Соликамска. Вследствие тектонических процессов, протекавших во время формирования Уральских складчатых гор, происходило нарушение первичных пластов с образованием солевых куполов. Соли, обладающие большой пластичностью и текучестью, выдавливались вверх, вызывая разрывы солевых пластов. В южном соленосном бассейне выявлено свыше тысячи соляных куполов.

В некоторых местах соляные купола выходят на поверхность, например купол Чапчачи (соляная гора Богдо) вблизи оз. Баскунчак. Многие же соляно-купольные структуры залегают на глубине 200—350 м, а иные и глубже 1000 м. Мощность солевых отложений в некоторых куполах огромна. В районе Волгограда была пробурена скважина глубиной более 4 тыс. м, но подошвы солевых отложений она так и не достигла.

В соляных шахтах устраивают санатории для легочных больных. Здесь легко дышится, воздух словно морской. Вокруг простор и первозданная белизна. Даже станции метро покажутся маленькими и тесными в сравнении с подземным «дворцом». Гладкие, точно полированные стены тянутся вверх высоко под белокаменную крышу. Дивные узоры у стены каньона как бы высечены из мрамора, а по ним примерно через каждую четверть ладони светятся темные узкие прослойки, чередующиеся в строгой периодичности. Это годовичные кольца. Зимой отложение солей и формирование пласта замедляются и появляются прожилки.

На стене можно увидеть прозрачный отпечаток грозного силуэта с выразительным плавником и хищным профилем акулы. Прошли тысячелетия, а может, и миллионы лет, пока на месте бывшего моря сформировалось соляное «чудо», а след морской разбойницы остался.

Соляная шахта находится в Донецкой области в г. Карло-Либкнехтовске. Здесь добывается минерал галит — белокаменная соль, не только важнейший пищевой продукт, но и важное сырье для химической промышленности.

А в умелых руках соль еще и предмет искусства. Есть в Карло-Либкнехтовске умельцы, которые из кристаллической, прозрачной, как хрусталь, соли с цветными включениями делают удивительной красоты вещи. Они исключительно выразительны, хотя и недолговечны: соль набирает влагу из воздуха и понемногу оплывает.

Наиболее масштабна добыча калийных удобрений. Калий входит в состав нескольких сот минералов.

Почти 18% массы земной коры приходится на долю ортоклаза. Это двойная соль кремниевой кислоты  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ . В результате химического выветривания ортоклаз превращается в каолин (разновидность глины), песок и поташ. Песок и глина идут на построение минерального костяка почвы, а калий, перешедший из ортоклаза в поташ, становится доступным для растений.

Часть ионов калия остается в почвенном растворе, который для растений служит источником питания. Но большая часть ионов калия поглощается коллоидными частицами почвы, откуда корням растений извлечь их довольно трудно. Вот и получается, что, хотя калия в земле много, растениям его часто не хватает.

Из-за того что комочки почвы «запирают» большую часть калия, содержание этого элемента в морской воде почти в 50 раз меньше, чем натрия. Подсчитано, что из тысячи атомов калия, освобождающихся при химическом выветривании, только два достигают морских бассейнов, а 998 остаются в почве. «Почва поглощает калий, и в этом ее чудодейственная сила», — писал академик А. Е. Ферсман.

Калий входит и в плоды, и в корни, и в стебли, и в листья, причем в вегетативных органах его, как правило, больше, чем в плодах. Характерно, что в молодых растениях больше калия, чем в старых. Замечено также, что по мере старения отдельных органов растений ионы калия перемещаются в точки наиболее интенсивного роста. При недостатке калия растения медленнее растут, их листья, особенно старые, желтеют и буреют по краям, стебель становится тонким и непрочным, а семена теряют всхожесть.

Растения, получившие достаточное количество калия, легче переносят засуху и морозные зимы. Это объясняется тем, что калий влияет на способность коллоидных веществ растительных клеток поглощать воду и набухать.

Самое дешевое калийное удобрение — печная зола. В ней калий находится в виде поташа  $K_2CO_3$ . Самым важным природным удобрением стали калийные соли, в первую очередь сильвин и каинит. Сильвин — очень распространенный минерал. Кроме хлоридов натрия и калия, в нем есть примеси солей кальция, магния и других элементов. Обычно в сильвине 14–18%  $K_2O$ .

В каините  $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  окиси калия меньше — 10—12%.

Значительную часть природных калийных солей перерабатывают в технический продукт — хлористый калий (50—62%  $\text{K}_2\text{O}$ ).

Соли могут обогащаться методом флотации. Обычные минералы плохо растворяются в воде. Но поваренная и другие соли полностью растворимы. Как их частицы разделить во флотационном процессе, происходящем в водной среде?

Вода способна растворять соли, пока концентрация ее не достигнет определенного предела, называемого концентрацией насыщенного раствора. Как только вода «насытится», растворение прекращается. В этом насыщенном рассоле можно флотировать растворимую соль. Конечно, нет смысла выбрасывать рассол вместе с хвостами флотации. Его можно вернуть обратно в процесс, удалив лишь твердую фазу и заменив ее новой порцией исходной руды — смеси солей. Этот процесс впервые был освоен в СССР.

Например, поваренную соль ( $\text{NaCl}$ ) — минерал галит — можно отделить флотацией от сильвина с помощью жирных кислот в щелочной среде и в насыщенном растворе  $\text{KCl}$  и  $\text{NaCl}$ . Можно применить и обратную флотацию — перевести в пену  $\text{KCl}$ , используя в качестве собирателя амин или алкилсульфонат натрия.

Интересно отметить, что жирные кислоты хорошо флотируют хлористый натрий ( $\text{NaCl}$ ), нитрат калия ( $\text{KNO}_3$ ) и хлористый калий ( $\text{KCl}$ ), если они не присутствуют в пульпе вместе. Но из смеси этих минералов флотируется только  $\text{NaCl}$ ; флотация хлористого калия или нитрата калия подавляется хлористым натрием.

Растворимость соли зависит в известной степени от присутствия других растворимых солей. Это определяется тем, что ионы в растворе связывают воду, гидратируясь и на новую соль остается меньше «свободной» воды. Чем активнее ионы данной соли связывают воду, тем меньше зависит ее растворимость от присутствия других солей. Растворимость солей связана с их флотируемостью. Если одна соль в присутствии другой имеет меньшую растворимость, то и ее флотируемость снижается. Этим объясняется изменение флотируемости солей в смесях.

Флотация солей применяется для производства калийных и некоторых азотных удобрений, выделения магние-

вых солей и т. д. Флотация в насыщенных растворах применяется для обогащения борных руд: бура и борная кислота флотируются из смеси с сульфатом магния даже без реагентов, в том числе и без пенообразователя.

Дело в том, что концентрированные растворы солей могут пениться и без пенообразователя, что связано со значительным увеличением поверхностного натяжения и упрочения поверхностной пленки воды в концентрированном растворе соли. Ионы соли, стремясь с большей силой, чем диполи воды, во внутренний объем, как бы увеличивают тем самым концентрацию молекул воды в поверхностном слое.

Такая поверхностная пленка хотя и менее прочна, чем пленка с органическим пенообразователем, все же увеличивает устойчивость пузырьков воздуха над рассолом. Это является одной из причин того, что возможна флотация гидрофобных минералов в рассоле.

Если соли калия и натрия смешаны слишком тесно, разделение их хлоридов производится методом галургии. При нормальных значениях температуры растворимость хлоридов калия и натрия почти одинакова. С повышением температуры растворимость  $\text{NaCl}$  почти не меняется, а растворимость  $\text{KCl}$  сильно возрастает. На холоде готовят насыщенный раствор обеих солей, затем его нагревают и обрабатывают им сильвинит. При этом раствор дополнительно насыщается хлористым калием, а часть поваренной соли вытесняется из раствора, выпадает в осадок и отделяется фильтрованием. Раствор охлаждают, и из него выкристаллизовывается избыточный хлористый калий. Кристаллы отделяют на центрифугах и сушат, а маточный раствор идет на обработку новой порции сильвинита.

Технический хлористый калий применяют и самостоятельно, и в смеси с природными калийными солями.

Можно удобрять и смешанной солью, содержащей смесь сульфатов калия, магния, натрия и др.

Природная полигалитовая соль содержит небольшие примеси меди, цинка и других микроэлементов. Все это обуславливает ее хорошие агрохимические качества.

Агроэффективность полигалита и других сернокислых солей, характерных для калийных месторождений юго-востока, высока для самых различных сельскохозяйственных культур: картофеля, свеклы, льна, кукурузы, гречихи, чая и др. Полигалитовая соль показала себя более эффективной, чем хлористый калий, из-за присут-

ствия сульфата магния и ряда микроэлементов. Полигалитовая соль — это не только сульфатная форма калий-по-магниевое удобрения, но и хорошее средство мелиорации солонцовых почв.

## Рабочая косточка века

Что ни век, то век железный

*А. Кушнир*

### Заря железного века

Почти 90% потребляемого сейчас человеком металла приходится на долю железа: оно составляет основу большинства сплавов, конструкционных материалов, станков и инструментов.

Самородное железо редко встречается в природе — чаще всего это осколки метеоритов. 6 тыс. лет назад древние египтяне делали железные украшения, которые ценились выше золотых. У древних хеттов было соотношение ценностей — медь : серебро : золото : железо = 1 : 160 : 1280 : 6400.

Камни, упавшие с неба, хранились в храмах и были предметом поклонения. Известно несколько тысяч метеоритов, дошедших до поверхности Земли и не сгоревших в атмосфере. Среди них есть каменные, железные и железокаменные. Железные метеориты состоят из почти чистого или никелистого железа, могут содержать кобальт, медь, фосфор, серу, углерод. Они образовались из астероидов — это значит, что во Вселенной летают гигантские куски самородного железа.

Существует легенда, что бухарский эмир приказал своим лучшим оружейникам отковать ему меч из куска «небесного железа». Но сколько они ни старались, ничего не получалось, нагретый металл не поддавался ковке. Никелистое метеоритное железо куется только холодным, а при нагревании становится хрупким.

У владетеля индийского княжества Джехангира в XVII в. были две сабли, кинжал и наконечник пика из метеоритного железа. Есть сведения, что из этого же металла были изготовлены шпаги Александра I и Боливар — героя освобождения Южной Америки от испанского владычества.

Выплавлять железо из руд люди научились свыше

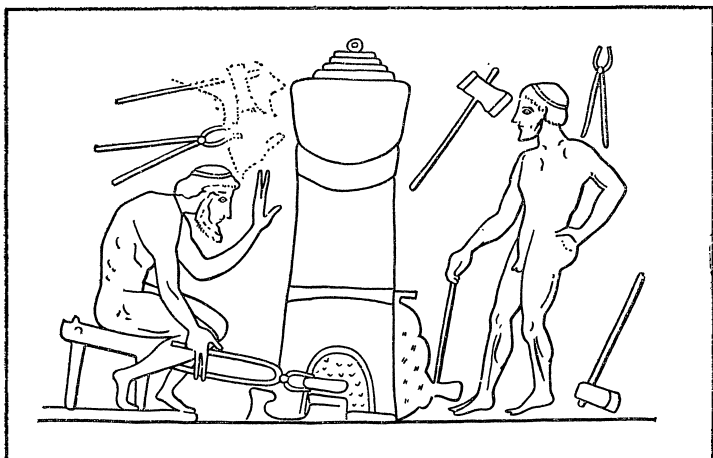
2 тыс. лет назад. Во всяком случае, в щелях пирамиды Хеопса найдены обломки железных орудий. Более 3 тыс. лет назад железо стало рабочим металлом в Греции, Закавказье, Китае. Вскоре новый металл полностью вытеснил камень как материал для изготовления оружия и орудий труда. Древнеримский энциклопедист Гай Плиний старший писал: «Железные рудокопы доставляют человеку превосходнейшее и зловернейшее орудие. Ибо сим орудием прорезываем мы землю, обрабатываем плодовые сады и, обрезая дикие лозы с виноградом, поощаедем их каждый год юнеть. Сим орудием выстраиваем дома, разбиваем камни и употребляем железо на все подобные надобности. Но тем же железом производим брани, битвы и грабежи и употребляем оное не только вблизи, но мечем окрыленное вдаль то из бойниц, то из мощных рук, то в виде оперенных стрел. Самое порочнейшее, по мнению моему, ухищрение ума человеческого. Ибо, чтобы смерть скорее постигла человека, соделали ее крылатою и железу придали перья. Того ради да будет вина приписана человеку, а не природе».

Термин «железный век» введен в середине XIX в. датским археологом К. Ю. Томсеном. Границы этого периода — от IX—VII вв. до н. э., когда у многих народов и племен Европы и Азии начала развиваться металлургия железа, до времени возникновения у этих племен классового общества и государства. Но если эпохи называть по главному материалу орудий труда, то железный век продолжается и сегодня.

Наши далекие предки получали железо так называемым сыродутным методом. Сыродутные печи устраивали обычно на склонах оврагов и канав. Они имели вид трубы, которую заполняли древесным углем и железной рудой. Уголь зажигали, и ветер, дувший в склон оврага, поддерживал горение угля. Железная руда восстанавливалась, и получалась мягкая крица — железо с включениями шлака. В нем содержалось немного углерода и примесей, перешедших из руды. Крицу ковали, куски шлака отваливались, и под молотом оставалось железо, пронизанное шлаковыми нитями. Из него отковывали различные орудия.

С появлением мехов для дутья отпала надобность устраивать сыродутные горны на склонах. Появились печи нового типа — так называемые «волчьи ямы», которые выкапывали в земле, и домницы, которые возвышались над землей. Их делали из камней, скрепленных глиной.





Извлечение крицы из горна домницы (изображение на древнегреческом сосуде)

При извлечении крицы из печи выливался и расплавленный чугун — железо, содержащее более 2% углерода и плавящееся при более низких температурах. В твердом виде чугун нельзя ковать, он разлетается на куски от удара молотом. Поэтому чугун, как и шлак, считался вначале отходом производства. Англичане даже называли его «свинским железом» — pig iron. Только потом металлурги сообразили, что жидкий чугун можно заливать в формы и получать из него различные изделия, например пушечные ядра.

Людам древности и раннего средневековья было знакомо и другое железо — знаменитая дамасская сталь (булат). Ее делали на Востоке еще во времена Аристотеля (IV в. до н. э.). Но технология ее производства и изготовление булатных клинков много веков держались в секрете.

Секрет булата не давал покоя металлургам многих веков и стран. Какие только способы и рецепты не предлагались! В железо добавляли золото, серебро, драгоценные камни, слоновую кость. Пробовали даже для закалки погружать клинок не в воду, а в тело мускулистого раба, чтобы его сила перешла в сталь.

Раскрыть секрет булата удалось в первой половине прошлого века русскому металлургу П. П. Аносову. Он объяснил происхождение уникальных свойств булата, связав их со структурой. Дендриты состоят из тугоплав-

кой, но относительно мягкой стали, а пространство между «ветвями» заполняется в процессе застывания металла более насыщенной углеродом, т. е. более твердой, сталью. Отсюда большая твердость и большая вязкость одновременно. Другой русский металлург — Д. К. Чернов установил, при каких температурах происходят фазовые превращения стали, изменяющие ее структуру («точки Чернова»).

После смерти П. П. Апасова секрет булата был вновь утерян. В третий раз его открыли уже в середине XX в.

Домницы превратились в домны в конце XVIII в. Одному из демидовских приказчиков пришла в голову мысль подавать дутье в доменную печь не через одно сопло, а через два, расположив их по обеим сторонам горна. Число сопл, или фурм, росло, дутье становилось все более равномерным, увеличивался диаметр горна, повышалась производительность печей.

Еще два открытия сильно повлияли на развитие доменного производства. Долгие годы топливом доменных печей был древесный уголь. Существовала целая отрасль промышленности, занимавшаяся выжиганием угля из дерева. В результате леса в Англии вырубали до такой степени, что был издан специальный указ королевы, запрещающий уничтожать лес ради нужд черной металлургии. После этого английская металлургия стала быстро хиреть. Британия была вынуждена ввозить чугун из-за границы, главным образом из России. Так продолжалось до середины XVIII в., когда Абрахам Дерби нашел способ получения кокса из каменного угля. Кокс стал основным топливом для доменных печей.

Основным потребителем железа к концу XVIII в. стали дороги, названные его именем. День рождения железной дороги — 14 июля 1825 г., когда на конкурсе паровозов в Англии победила «Ракета», построенная Дж. Стивенсоном. «Она летала, как ветер», — говорили лондонцы. «Ракета» развивала скорость около 30 км/ч.

### **Минералургия железа**

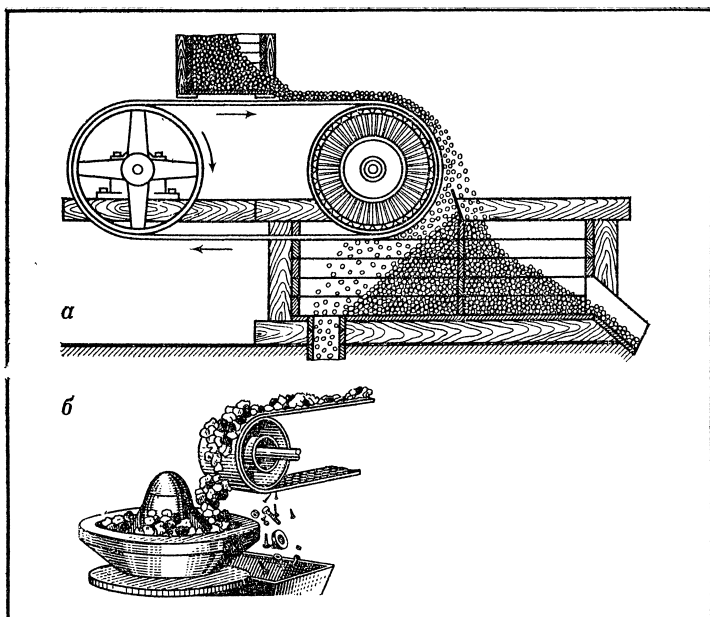
Железо входит в состав более чем 300 минералов, занимая 4,65% массы земной коры. Оно накапливается в магме и осадках, образуя различные виды месторождений с содержанием железа до 50–60%. Это оно придает красный, бурый и желтый цвет горным породам, глинам, пескам.

Однако промышленных минералов железа всего несколько. Главный из них — магнетит, магнитный железняк ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ ), смесь оксидов двух- и трехвалентного железа. Месторождения магнетита известны во многих странах мира. В СССР наиболее крупные — Уральские, Курская магнитная аномалия, Криворожские и другие, благодаря им наша страна занимает первое место в мире по запасам железных руд.

Кроме магнетита, промышленное значение имеют сопутствующие ему оксиды — гематит и мартит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Кристаллический гематит называют железным блеском, а топочернистый — красным железняком. Карбонат железа — сидерит и гидрооксиды — лимонит и гётит имеют бурую и желтовато-бурую окраску. Эти минералы слабомагнитны, имеют немного меньшую плотность, чем магнетит, и, как правило, добываются только вместе с ним. Титаномагнетиты — ильменит, перовскит и другие — также имеют промышленное значение, но добываются ради титана. Перспективным источником железа являются также пиритные огарки, остающиеся после обжига пирита в производстве серной кислоты.

Основным способом обогащения железных руд является магнитная сепарация. Минералы-ферромагнетики содержат ионы с неспаренными спинами, магнитные моменты которых ориентируются кристаллическим полем в пределах магнитных доменов; их можно уподобить микромагнитам размером от микрометра до миллиметра. Магнитные моменты доменов в отсутствие магнитного поля имеют различную ориентацию, поэтому намагниченность, например, чистого самородного железа не проявляется. В магнитном поле домены, подобно спинам в парамагнетиках, ориентируются, что вызывает разориентацию доменов у одних минералов сразу, у других спустя некоторое время, а у третьих сохраняется остаточная намагниченность. Это связано с разной подвижностью магнитных моментов доменов в разных минералах, зависящей от наличия нарушений кристаллической решетки — дислокации, включений других минералов, зональности или мозаичности кристаллов и других неоднородностей.

Ни один природный минерал не притягивается магнитом с такой силой, как металлическое железо, но зато почти все железосодержащие минералы обладают в той или иной степени магнитными свойствами. Магнетит содержит 72% железа и всего в 2,5 раза слабее, чем ме-



Принципиальная схема магнитной сепарации

а — сепаратор, б — железоловитель

таллическое железо, притягивается магнитом. Несколько слабее притягивается железомарганцевый минерал — франклинит и железотитановые — титаномagnetит и ильменит. Эти сильномагнитные минералы легко отделяются электромагнитом. Еще в XVII в. обычным магнитом магнетит удаляли из смеси тяжелых минералов. Плотность магнетита —  $5,2 \text{ г/см}^3$ , при промывке и гравитационном обогащении он попадает в шлихи вместе с золотом, вольфрамитом, касситеритом.

Большинство минералов проявляют магнитные свойства только в сильном магнитном поле с высокой напряженностью. Магнитная индукция, которую создает магнитное поле, изменяется в присутствии минерала. Мерой ее изменения служит магнитная проницаемость минералов и связанная с ней магнитная восприимчивость. Магнитные свойства зависят не столько от содержания железа, сколько от структуры соединения. Наиболее магнитна окись-закись железа — магнетит. Окиси железа — гематит и лимонит — слабомагнитны. Невелика магнит-

ность сульфида железа — пирита и карбоната железа — сидерита. Чтобы изменить природные свойства минералов, руду обжигают, нагревая до температуры 550—600° С с добавкой углерода, а сидерит, содержащий углерод, — без добавок. Вместо углерода можно применить доменный или коксовый газ, содержащий окись углерода, которая также действует как химический восстановитель. Восстанавливая часть трехвалентного железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в закись-окись  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  — магнетит, обжиг превращает все железные минералы, содержащиеся в руде, в сильномагнитные. Кроме того, обжиг облегчает последующее дробление и измельчение, так как нагревание до высокой температуры и охлаждение приводят к растрескиванию породы.

Основная часть магнитного сепаратора — электромагниты, создающие магнитное поле определенной интенсивности, в котором немагнитные и магнитные минералы ведут себя по-разному. На немагнитные действует только сила тяжести; магнитные, кроме того, притягиваются электромагнитом. Соотношение этих двух сил и определяет траекторию движения магнитных частиц.

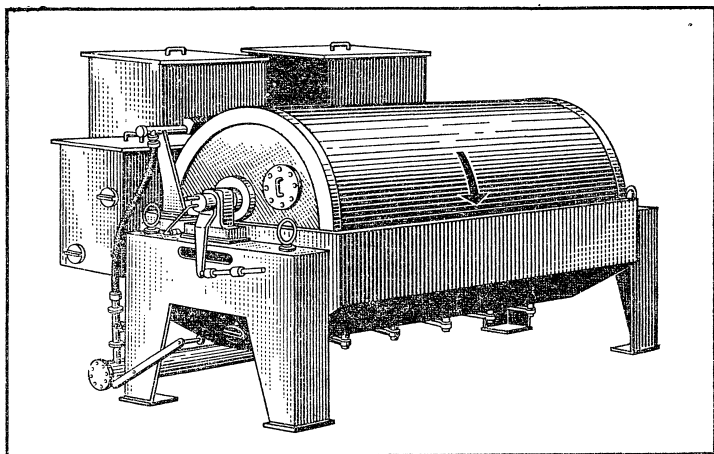
Частицы с различной магнитной восприимчивостью попадают в различные фракции. Чем сильнее и определеннее выражены магнитные свойства, тем точнее сепарация.

В зависимости от соотношения магнитных восприимчивостей разделяемых минералов применяются сепараторы с различной интенсивностью магнитного поля. Сепарация может происходить как в воздушной, так и в водной среде.

Кроме электромагнитов, сепараторы снабжены устройством для непрерывной загрузки руды и разгрузки концентратов и хвостов.

Простейшей конструкцией магнитного сепаратора, отвечающей всем этим требованиям, является вращающийся барабан с системой электромагнитов (подвижной или неподвижной) внутри. Материал подается сверху на цилиндрическую поверхность барабана: магнитные зерна притягиваются и падают под барабан, а немагнитные скользят по поверхности и оказываются в приемнике перед барабаном.

Барабанный сепаратор для сухого обогащения был изобретен Венстремом в конце XIX в. в Швеции, славящейся богатыми залежами железных руд. Там же в начале XX в. Грондаль разработал для «мокрой» сепарации мел-



Барабанный магнитный сепаратор

кой магнетитовой руды конструкцию сепаратора, оборудованного специальной ванной, в которую подается пульпа с рудой. Барабан может помещаться в воде или над ее поверхностью.

Иногда применяется сепаратор с двумя барабанами. В нем концентрат с первого барабана перемещается на второй. Барабан можно заменять системой последовательно расположенных роликов.

Однако барабанные сепараторы не могут обеспечить достаточно интенсивного магнитного поля. Большая поверхность барабана «распыляет» это поле. Поэтому для обогащения слабомagnetных вольфрамовых руд был создан сепаратор с замкнутой магнитной системой и заостренными полюсами, между которыми проходила лента транспортера, несущая материал. Такой сепаратор впервые сконструировал Ветерилл в США в конце XIX в.

Вскоре стали применяться и «мокрые» ленточные сепараторы с транспортером, погруженным в пульпу.

В России первый магнитный сепаратор (барабанный) был сконструирован В. А. Петровым в 1911 г. Он был установлен на Урале для сухой сепарации магнетитовой руды.

Серийное изготовление магнитных сепараторов началось у нас только в 1932—1934 гг. А сейчас в СССР созданы различные конструкции магнитных сепараторов. Разработана теория магнитного обогащения руд. Работы

И. С. Дацюка, В. Г. Деркача, В. И. Кармазина, В. В. Кармазина и других позволили создать эффективные способы магнитной сепарации материалов.

Методом сухой магнитной сепарации обогащаются в основном магнетитовые и титаномагнетитовые руды, а также руды редких металлов. Мокрая сепарация применяется для обогащения сильно- и слабомагнитных руд.

Полиградиентные сепараторы, основанные на фильтрации пульпы через слой магнитных шаров, позволяют значительно увеличить напряженность магнитного поля, уменьшить относительную скорость движения частиц, а следовательно, уменьшить крупность обогащаемого материала.

Для мокрого магнитного обогащения топкиоизмельченных руд, например оловянных и редкометалльных, создан ряд полиградиентных электромагнитных роторных сепараторов с ферромагнитными телами, имеющих среднюю магнитную индукцию в рабочей зоне 12 000—15 000 Гс.

А что если на поле силы тяжести наложить еще и магнитное поле, направленное в ту же сторону, т. е. вниз? Тогда магнетит и другие минералы железа будут стремительно оседать, а более легкие и немагнитные кварц, глины, слюды, роговики можно вымыть потоком воды, направленным вверх.

Этот принцип реализован в изобретении П. И. Зеленова, П. А. Усачева и др. Цилиндрическая емкость обвита токопроводом в виде соленоида, а поток воды, направленный вверх со скоростью, обеспечивающей вынос частиц кварца, работает как гидравлический классификатор. «Бочки Зеленова» установлены на Оленегорской железорудной фабрике и работают как сгустители магнетитового концентрата и как обогатительные аппараты, обеспечивающие получение практически чистого, беспримесного магнетитового суперконцентрата. Содержание кварца в нем менее 0,2%.

Такой концентрат пригоден для порошковой металлургии, которая состоит в спекании железистого порошка под давлением с одновременной формовкой деталей. Обработка металла по этому способу является безотходной, а благодаря высокой чистоте порошковое железо почти не ржавеет. Сделанные из такого железа днища кораблей, находясь в соленой воде, десятилетиями не подвергаются коррозии.

## Черная металлургия

Генри Бессемер был механиком без образования. Он изобретал что придется: машинку для гашения марок, парезную пушку, различные механические приспособления. На металлургическом заводе у Бессемера появилась мысль использовать для тяжелой «горячей» работы сжатый воздух. В 1856 г. он запатентовал способ производства стали продуванием воздуха через жидкий чугун, находящийся в конвертере — грушевидном сосуде из листового железа, выложенном изнутри кварцевым огнеупором.

Кислород воздуха окисляет железо в закись —  $\text{FeO}$ . Последняя растворяется в чугуне и окисляет углерод, кремний, марганец... Из окислов железа, марганца и кремния образуются шлаки. Процесс ведут до полного выгорания углерода.

На бессемеровском конвертере из чугуна не удалялись вредные примеси — сера и фосфор. От серы научились избавляться, добавляя в жидкую сталь богатый марганцем чугун или ферромарганец. С фосфором, который не удалялся в доменном процессе и не связывался марганцем, дело обстояло сложнее. Некоторые руды, такие, как лотарингская, отличающиеся высоким содержанием фосфора, оставались непригодными для производства стали. Выход был найден английским химиком С. Д. Томасом, который предложил связывать фосфор известью. Конвертер Томаса в отличие от бессемеровского был футерован обожженным доломитом, а не кремнеземом. В чугун во время продувки подавали известь. Образовывался известково-фосфоритный шлак, который легко отделялся от стали. Впоследствии этот шлак даже стали использовать как удобрение.

Революция в сталеплавильном производстве произошла в 1864 г., когда отец и сын Пьер и Эмиль Мартены использовали для получения стали регенеративную газовую печь. В ней благодаря подогреву газа и воздуха в камерах с огнеупорной насадкой достигалась такая температура, что сталь в ванне печи переходила в жидкое состояние. Ее можно было заливать в ковши и формы, изготавливать слитки и прокатывать их в рельсы, балки, строительные профили, листы. Кроме того, появилась возможность использовать громадные количества лома, скопившегося на металлургических и машиностроительных заводах.



Последнее обстоятельство сыграло очень важную роль в становлении нового процесса. В начале XX в. мартеновские печи почти полностью вытеснили бессемеровские и томасовские конвертеры, которые хотя и потребляли лом, но в малых количествах.

Температура в мартеновской печи достигает  $1700-1800^{\circ}\text{C}$ , а в фокусе горения до  $2000^{\circ}\text{C}$ . Более низкое качество конвертерной стали объясняется растворением в ней азота воздуха. Новую жизнь в конвертерный процесс вдохнуло кислородное дутье.

Опыты были впервые проведены в 1945 г. на московском заводе «Динамо». В 1956 г. на выплавку стали на чистом кислородном дутье перешел конвертерный цех металлургического завода имени Петровского. А в начале 1958 г. вступил в строй самый крупный цех такого типа на заводе «Криворожсталь».

Кислород подается через трубку, опущенную в металл сверху. В месте соприкосновения кислорода и металла температура поднимается до  $3000^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре плавятся самые тугоплавкие металлы.

Идеальным было бы такое ведение процесса, в котором не участвовали бы ни воздух, ни газы горения топлива. Только варьируя добавками, шлаками, примесями, можно сварить сталь точно заданного состава. И такой процесс существует. Это — электроплавка.

В печь загружают шихту. Включаются и опускаются графитовые электроды. В пламени электрических разрядов температура достигает  $4000^{\circ}\text{C}$ . Шихта плавится, струйки металла стекают и накапливаются на подише. И вот электроды уже консулись жидкого металла. Во время плавки сталевары добавляют в электропечь известь и другие флюсы, паводя первый шлак. В него начинает переходить из расплавленного металла фосфор. Затем они обеспечивают удаление из металла водорода, азота и неметаллических включений. И первый шлак удаляют. Для образования нового шлака в печь снова добавляют известь.

В результате всех манипуляций, длящихся около шести часов, получается сталь, какую нельзя получить никаким другим известным способом. Она содержит предельно малое количество фосфора и серы, очень немного неметаллических включений и точно заданные количества нужных добавок.

## Русское железо

Почти два с половиной столетия назад по замыслу Петра I встал город Екатеринбург у Каменного Пояса, на границе Европы и Азии, чтобы помочь молодой державе строить военный и торговый флот, вооружить армию, выйти из зависимости от иноземных государств. Трудно назвать другой город, где с первых дней существования возникло бы такое обилие ремесел. Появилась армия умельцев: рудознатцев, кузнецов, углекопов, камнерезов, «плавыльных» мастеров.

На севере Урала, за стеной леса — город Невьянск. Когда-то сюда приехал родоначальник фамилии Демидовых, «усовершенствитель и распространитель» заводов на Урале. Первый уральский чугун получен в Невьянске. Завод некоторое время преуспевал, но потом сжег вокруг себя все леса, остался без топлива и захирел. От старого завода осталась лишь знаменитая «падающая» башня, с которой связано много мрачных преданий.

Нижний Тагил Демидовы называли своей «северной столицей». Царская грамота, которую получил от Петра I предприимчивый тульский кузнец Никита Демидов, явилась ключом к сокровищам Уральского хребта. Почти двести лет владычествовала в «горном гнезде» эта династия. Ей принадлежало около миллиона десятин лучшей земли, 11 заводов, более 100 приисков, угольные копи, рудники, железные дороги.

Благодаря стараниям талантливых уральских мастеров Нижнетагильский завод быстро набирал силу. Через десять лет после основания он занял первое место в мире по производству чугуна. Великобритания и США охотно покупали железо, выплавленное из магнитной руды горы Высокой: оно отличалось чистотой, податливой мягкостью и гибкостью.

Думая о судьбе Тагила, Мамин-Сибиряк предполагал, что уже недалеко то время, когда этот завод «сделается русским Бирмингемом». Однако бешеная погоня заводчиков за прибылью, их нежелание сколько-нибудь совершенствовать производство постепенно привели промышленность города к полному застою. Известный русский металлург М. А. Павлов, совершивший в конце XIX в. поездку по уральским заводам, был поражен тем, что во всем Тагильском округе встретил лишь одного инженера. Это был его товарищ по институту В. Е. Грум-Гржимайло.

Мамин-Сибиряк так писал о судьбе рабочего, занятого огненной работой: «...хорошо, если такой рабочий женится вовремя и к тому времени, когда он уже не в силах будет работать, у него успеют подрасти на смену дети: в противном случае ему грозит положительная нищета. На огненной работе в 15—20 лет вытянется какой угодно рабочий...»

В те времена рабочий получал в среднем чуть больше 11 руб. в месяц. А вот своей «иждивенке», принцессе Матильде, тагильский завод выплачивал ежемесячно свыше 4000 руб. Анатолий Демидов, купивший в Италии титул князя Сап-Донато, женился на племяннице Наполеона Матильде. Князь был крутого нрава и однажды побил жену. Николай I разрешил принцессе оставить мужа, а Демидова обязал платить ей по 50 тыс. руб. в год. Кратковременная жена Демидова шестьдесят лет была на иждивении тагильских рабочих...

До Октябрьской революции Тагил был рабочим поселком с прудом, господским домом, церквями и бронзовым памятником. Рабоченный скульптор изобразил Демидова в величественной позе, он снисходительно протягивает руку коленопреклоненной женщине в царской короне, олицетворяющей Россию.

Несмотря на огромные запасы, Россия в 1913 г. давала лишь около 6% мирового производства металла.

В. И. Ленин придавал первостепенное значение развитию черной металлургии. В 1913 г. в огромной стране со 150-миллионным населением было выплавлено лишь 3,6 млн т стали. Сейчас это средняя годовая производительность среднего металлургического завода.

В 1985 г. в СССР добыто около 250 млн т товарной железной руды. Идет освоение железорудных месторождений Сибири, Казахстана, Дальнего Востока.

По объему добычи железной руды и выплавке стали СССР занимает первое место в мире. Однако это обстоятельство еще не может служить предметом большой гордости. Дело в том, что удельный вес легированных высококачественных сталей в нашей черной металлургии относительно невелик, несмотря на то что именно русские ученые — Амосов, Чернов и другие заложили научные основы выплавки качественных сталей. В результате из большого количества стали мы производим более тяжеловесные конструкции, меньше машин и приборов. Перестройка структуры черной металлургии — одна из важнейших задач XII пятилетки.

В частности, освоение Качканарского месторождения, по содержанию железа самого бедного из всех разрабатываемых в мире (всего 15—18% железа), обусловлено тем, что руда здесь природно легирована ванадием. Это дает возможность не только получать легированную сталь из руды Качканара, но и дополнительно извлекать ванадий из шлаков металлургии.

### Черный осветлитель

Землистый темно-серый минерал пиролюзит является основным источником ближайшего соседа железа по таблице Менделеева — марганца. Вместе с ним встречаются похожие на него псиломелан (в переводе с греческого — черная стеклянная голова), манганит, название которого происходит от латинского названия марганца. Все это окислы марганца. В последнее время промышленное значение приобрел и карбонат марганца — родохрозит. Его второе название — роза инков (от греч. «родон» — роза). Отполированные крупные штUFFы малинового или темно-розового родохрозита — красивый поделочный камень. Самое известное месторождение находится в Аргентине, близ Сан-Луиса. Здесь в серебряных рудниках, оставленных инками в XIII в., встречаются родохрозитовые сталагмиты. Но в качестве ювелирного камня родохрозит стал применяться только с середины XX в.

На родохрозит внешне очень похож и силикат марганца — родонит. В Уральских горах он был известен под названием орлец. Примеси черных и темно-бурых окислов марганца создают неповторимые узоры орлеца. В Государственном Эрмитаже стоит огромная ваза из орлеца: ее эллипсоидная чаша размером 1,8×1,3 м выточена из монолита. Мастера трудились 30 лет, закончив работу в 1867 г.

Марганец — довольно распространенный элемент, особенно часто присутствующий в железных рудах. Но его месторождения достаточно редки. Самые крупные — Чиатурское и Никопольское месторождения — находятся на территории СССР, благодаря чему наша страна занимает первое место в мире по запасам и добыче марганцевой руды.

Оба месторождения имеют осадочное происхождение, образовались в прибрежных зонах третичного моря в результате жизнедеятельности микроорганизмов. Чиатурское месторождение расположено в горах Кавказа на вы-

соте 800 м над уровнем моря. Оно представляет собой серию прослоек толщиной от 2 до 5 м. Отработка его ведется уже более 100 лет, как и на Украине. Марганцевая руда — один из первых предметов экспорта молодой Советской республики. Марганцевые концентраты экспортируются и сейчас. Чиатурский рудник восстановили в 1923 г., и с тех пор у причалов Поти собирались десятки иностранных кораблей, вывозивших руду. В начале 30-х годов был построен Зестафонский ферросплавный завод, на котором из чиатурской руды получали ферромарганец.

Для обогащения марганцевых руд применяется главным образом гравитационный метод — отсадка. При этом тонкие частицы хрупких марганцевых минералов практически терялись. Из-за этого горная речка Квирила, вытекающая из живописной долины Сачхере, ниже г. Чиатуры превращалась в темный грязный поток. Частицы пиролюзита плывут в воде реки на протяжении нескольких сот километров, поскольку все они одноименно (отрицательно) заряжены, не слипаются и не оседают; из Квирилы они попадают в Риопи, а оттуда в Черное море.

Часть марганцевых шламов извлекается на специально построенной флотационной фабрике методом пенной сепарации. Метод был предложен еще в 1940 г. В. А. Малиновским, но его промышленное освоение началось только в 60-х годах. В отличие от обычной флотации пульпа подается не в подпенную зону, а непосредственно на слой пены. Подобный метод обеспечивает резкое увеличение продолжительности контакта минералов с пузырьками воздуха, что создает наиболее благоприятные условия для минерализации воздушных пузырьков, в особенности крупными частицами. Поскольку после отсадки частицы крупнее флотационных все же теряются, этот метод впервые был использован для марганцевых руд.

В марганцевых минералах всегда присутствует железо, поэтому они обладают слабомагнитными свойствами. Поэтому извлечение марганцевых шламов возможно на полиградиентных магнитных сепараторах. Пульпа прогоняется через слой железных шаров, находящихся в магнитном поле. При этом в точках соприкосновения шаров и вблизи них напряженность магнитного поля достаточно высока и слабомагнитные частицы там оседают, как на фильтре. Затем секция с шарами выходит из магнитного поля и марганцевый концентрат вымывается из слоя шаров.

Интересно отметить, что, хотя марганец немагнитен, сплав его с немагнитными медью и оловом обладает ферромагнитными свойствами. Олово можно заменить алюминием, мышьяком, сурьмой, бором или висмутом.

Марганцевый минерал пиролюзит под названием «черная магнезия» применялся при варке стекла. Поскольку зеленый и бурый цвет стеклу придает железо, его необходимо окислить. Пиролюзит окисляет серпистые соединения железа, «осветляя» стекло. Возможно, происхождение латинского названия марганца связано с его ролью в стекловарении: «манганидзейн» означает «чистить».

Замстим, что Плиний Старший (I век н. э.) считал пиролюзит разповидностью магнитного железняка. Отсутствие магнитных свойств у пиролюзита Плиний объяснял принадлежностью его к женскому полу, к которому магнит равнодушен.

Ту же роль окислителя играет марганец и в доменной плавке железа. Марганцевый концентрат добавляют в плавку для образования легкоплавкого сульфида марганца, который переходит в шлак. Марганец хорошо связывает и кислород. Еще в прошлом веке из марганцовистых железных руд выплавляли «зеркальный» чугун, который применяется для раскисления и пауглероживания стали, т. е. для удаления из нее серы и кислорода. Теперь для этой цели применяют ферромарганец.

Для легирования стали марганец обычно вводят вместе с хромом, кремнием, вольфрамом. Однако есть сталь, в состав которой, кроме железа, марганца и углерода, ничего не входит. Это сталь Гадфилда, содержащая 1—1,5% углерода и 11—15% марганца, она обладает огромной износостойкостью и твердостью. Ее применяют для изготовления дробилок, деталей экскаваторов и бульдозеров. Твердость этой стали такова, что она не поддается механической обработке, детали из нее можно только отливать.

Сплавы марганца с медью обладают высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Из этих сплавов делают лопатки турбин, а из марганцовистых бронз — винты самолетов и другие авиадетали.

Относительно недавно стало известно о новом потенциальном источнике марганца. Это железомарганцевые конкреции — овальные комки, лежащие на дне океанов. Еще в 1969 г. при глубоководном погружении подводной лодки была добыта со дна гигантская конкреция массой около 90 кг. Ее состав, считая только главные компонен-

ты: по 25% марганца и кристаллизационной воды, 15% железа. Предполагается, что запасы железомарганцевых конкреций на дне Тихого океана составляют около 2 млрд т, а поскольку конкреции образуются путем коагуляции и осаждения минеральных веществ из морской воды, их запасы растут в среднем на 90 млн т в год.

Конкреции содержат также кобальт, никель и медь. Но добыча и переработка их крайне трудны. Сбор конкреций на дне океана требует создания принципиально новых добычных устройств. Даже извлеченные на сушу, они долго сохраняют свою влажность. Раздробить их в обычных дробилках невозможно, они просто сминаются в блинообразные комки. Так что пока этот перспективный источник марганца еще не освоен.

## Металлическая основа Земли

Рано или поздно алюминий заменит собою дерево, а может быть, и камень.

*Н. Г. Чернышевский*

### Рубины и сапфиры

Масса земной коры на 8,8% состоит из алюминия. В основном он содержится в трехокиси алюминия  $Al_2O_3$  и, алюмосиликатах (также в виде трехокиси). Этот элемент в значительных количествах входит в состав глин, каолинов, полевых шпатов, слюд и многих других минералов — всего их известно свыше 250. Трехокись алюминия — необычайно прочное и устойчивое соединение, так, глинозем плавится только при 2000° С.

Сродство алюминия к кислороду настолько велико, что сгорание металлического алюминия в кислороде является одной из самых сильных экзотермических реакций. Идея использования этой реакции в ракетах впервые была высказана Ф. А. Цандером — одним из основателей Группы изучения ракетного движения (ГИРД), старшего сподвижника С. П. Королева. Алюминиевый порошок используется как присадка к ракетному топливу.

Основным сырьем для производства алюминия является боксит — глинистая порода, состоящая в основном из гидроокисей алюминия. Впервые такая порода была найдена во Франции, близ деревни Бо. Мировая добыча бокситов составляет сейчас десятки миллионов тонн в год.

Содержание глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в бокситах колеблется от 28 до 60%. Бокситы используются для производства не только металлического алюминия, но и красок, сорбентов, цемента, огнеупоров, а также искусственных корундов.

В отличие от глиноподобных мягких бокситов корунды, имеющие почти ту же химическую формулу —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , уступают по твердости лишь алмазу. Корунды широко используются в качестве абразивов, а два минерала группы корунда — рубин и сапфир — известны как драгоценные камни.

Яркий блеск красного рубина и синие переливы сапфира восхитительны. Замечательно, что один и тот же минерал благодаря ничтожному количеству различных примесей славится различными великолепными цветами. Существуют желтые камни, обладающие наибольшей твердостью, блестящие, почти бесцветные камни, правда, уступающие алмазу по игре, камни, обладающие другой, менее привлекательной окраской — лиловой, желтоватой, голубоватой и зеленой. При внимательном рассмотрении оказывается, что лиловые камни состоят из чередующихся синих и красных слоев; обычны желто-синие пятнистые камни. Благодаря особенностям кристаллической структуры в некоторых камнях, ограненных в виде округлого тела (кабошона), как бы высвечивается яркая звезда.

Термин «корунд» применяется для обозначения непрозрачных камней, которые измельчаются в порошок и используются как абразив. Такой «корунд» является относительно чистым материалом, чем отличается от «наждака», также представляющего собой измельченный корунд, но в смеси с магнетитом и другими тяжелыми минералами, имеющими более низкую твердость. Словом «сапфир» ювелиры обозначают все разновидности корунда, за исключением красного рубина. Сапфир в зависимости от примесей в структуре корунда бывает белым, желтым, зеленым, синим и даже розовым.

Слово «рубин» происходит от латинского *ruber* — красный. В средние века, когда о природе драгоценных камней знали немного, это слово широко использовалось для обозначения всех красных камней, но в конце концов стало прилагаться лишь к наиболее твердому из них — красной разновидности корунда.

Чистый корунд бесцветен. Чудные цвета, прославившие этот минерал, обязаны своим происхождением ничтожнейшим примесям других элементов. Так, рубин своей



окраской обязан хрому. Окись хрома изоморфна с глиноземом, и поэтому хром гармонично входит в кристаллическую структуру глинозема, замещая алюминий. Но ионы хрома превышают по размерам ионы алюминия, деформируя кристаллическую структуру, из-за чего видимый свет сдвигается в красную область спектра. В опытах по синтезу рубина окись хрома добавляется в качестве окрашивающего агента.

Синий цвет сапфира обусловлен присутствием в нем титана; разработан синтез сапфиров с применением этого элемента в качестве окрашивающего материала. Желтая окраска корунда связана с присутствием окиси железа.

Помимо украшений, драгоценный корунд благодаря высокой твердости применяется в качестве подшипников для движущихся частей в часах и других высокоточных приборах. В этой области синтетический корунд вытеснил натуральные камни — не столько из-за его меньшей стоимости, сколько из-за того, что ориентировку кристалла, которая является важным фактором, легче установить на выращенном кристалле.

Несмотря на успешный синтез рубина, сапфира и других разновидностей корунда, такие материалы не обладают какой-либо коммерческой ценностью. Естественные камни уникальны и поэтому стоят дорого. Крупные рубины, встречающиеся сравнительно редко, являются одними из самых драгоценных камней. Крупные сапфиры встречаются чаще и стоят дешевле. Желтые и другие разновидности корунда пользуются небольшим спросом, и цены на них низкие.

Почти вся мировая добыча красивых рубинов осуществляется в знаменитых рубиновых копях, расположенных в Бирме на высоте около 1200 м над уровнем моря.

До 1885 г. разработка копей являлась монополией бирманских владык и велась только по выдаваемым королем лицензиям. Копи были известны еще в глубокой древности, но их ранняя история окутана тайной. Говорят, что некий хитрый король в 1597 г. выменял бесполезную якобы территорию у соседних китайских владык на небольшой и не имевший значения город на реке Иравади. Копи разрабатывались получившими лицензию рудокопами — «пожирателями руды», как их называли на языке этой страны, которые должны были не только платить за полученную привилегию, но и отдавать королю все камни массой свыше некоторой определенной величины. Королевские чиновники постоянно подозревали горняков в

том, что они нарушают закон и разбивают наиболее крупные кампи.

После 1887 г. копи разрабатывались английской компанией «Бёрма руби майнз». По мере истощения богатых площадей и с усилением конкуренции синтетических рубинов возникли финансовые трудности, так что в 1931 г. фирма прекратила свое существование. Контроль за этой отраслью промышленности взяло на себя правительство Бирмы, и вскоре оно стало выдавать лицензии, предусматривающие использование механизмов и взрывчатых веществ, хотя все еще были широко распространены примитивные методы добычи. Японское вторжение во время второй мировой войны положило конец работам вплоть до 1945 г.

Недалеко от месторождения рубинов в Бирме добывают и сапфиры. Огромный камень, известный под названием «Драгоценность джунглей», был найден в 1929 г. на поверхности земли, непосредственно под травяным покровом; в необработанном виде он весил 958 карат.

Богатейшие месторождения сапфиров и рубинов имеются в Таиланде, Шри Ланке, Кампучии, Индии. В СССР эти минералы встречаются на Урале и Памире.

### Крылатый металл

В самородном виде алюминий в природе не встречается, а получение его из глинозема столь трудный и сложный процесс, что металлический алюминий впервые появился только в 1825 г.

Тем не менее существует легенда, рассказанная Плинием Старшим, о том, как 2000 лет назад к римскому императору Тиберию пришел незнакомец и преподнес ему чашу из блестящего, серебристого, очень легкого металла.

«Из чего ты ее сделал?» — спросил Тиберий. «Из глины», — ответил незнакомец. «Из глины? — удивился император. — Но ведь она встречается повсюду!» И приказал казнить умельца, уничтожить его мастерскую, дабы это неожиданное изобретение не обесценило драгоценные металлы римской казны.

В III веке н. э. китайцы с почестями похоронили своего полководца Чжоу Чжу. Положили его в гробницу, украшенную рельефным металлическим орнаментом. Когда современные исследователи изучили состав древнего сплава, в нем оказалось 85% алюминия, 10% меди и 5% магния.

Достоверно, что первый металлический алюминий в 1825 г. получил датский физик Ханс Христиан Эрстед, известный в первую очередь своими работами по электромагнетизму. Эрстед пропускал хлор через раскаленную смесь глинозема с углем и полученный безводный хлористый алюминий нагревал с амальгамой калия. Затем амальгаму разлагал нагреванием, ртуть испарялась, и алюминий явился на свет.

В 1827 г. Фридрих Вёлер получил алюминий, вытеснив его из того же хлорида металлическим калием. Промышленный способ получения алюминия был разработан лишь в 1855 г.

Но по-настоящему доступным этот металл сделала электротехника. Электролиз расплава пытались осуществить еще Дэви и другие химики. Но чистая окись алюминия плавится при температуре  $2050^{\circ}\text{C}$  и не растворяется в воде, а чтобы получить алюминий, ее надо подвергнуть электролизу. Необходимо было пайти способ как-то снизить температуру плавления глинозема хотя бы до  $1000^{\circ}\text{C}$ ; только при этом условии алюминий мог стать технически важным металлом. Эту задачу блестяще разрешил молодой американский ученый Чарльз Мартин Холл и почти одновременно с ним француз Поль Эру. Они выяснили, что глинозем хорошо растворяется в расплавленном криолите ( $3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$ ).

Чарльз М. Холл 16-летним подростком поставил перед собой эту задачу. Вот что рассказал его учитель профессор Иветт.

«Как-то, беседуя со студентами, я сказал: „Изобретатель, которому удастся разработать дешевый способ получения алюминия и сделать алюминий металлом массового потребления, окажет большую услугу человечеству и заслужит славу выдающегося ученого“. Я услышал, как, обернувшись к одному из своих сокурсников, Чарльз сказал: «Я займусь этим металлом». Он испробовал множество методов, но все безуспешно. Наконец, Холл остановился на электролизе. Я отдал ему старые, пенужные батареи.

Вскоре Холл закончил колледж. Он устроил свою лабораторию в лесу неподалеку от дома, упорно продолжал свои опыты.

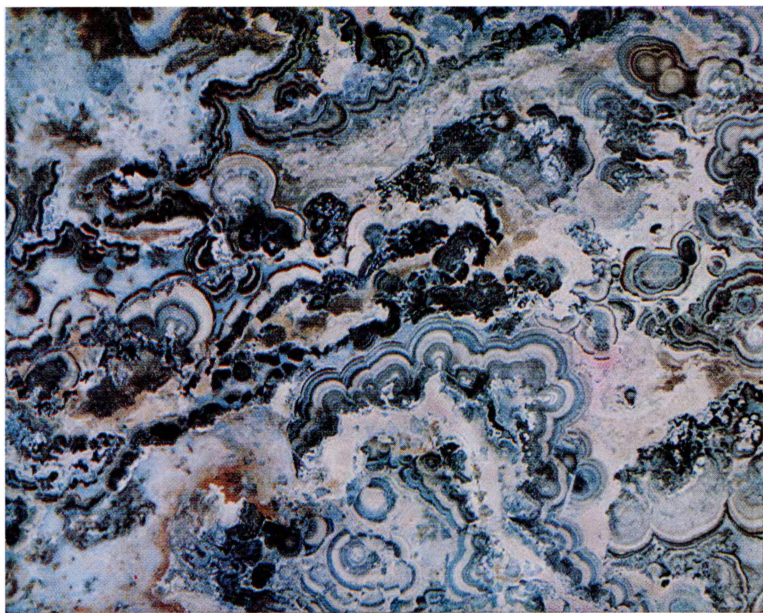
Нужно было найти растворитель для окиси алюминия — основного алюминиевого сырья. И через шесть месяцев Холл установил, что окисел хорошо растворим в расплаве фтористого алюмината натрия  $3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$ .



Самородок золота



Алмаз «Орлов»



Шлиф породы с касситеритом



**Галенит (свинцовый блеск)**

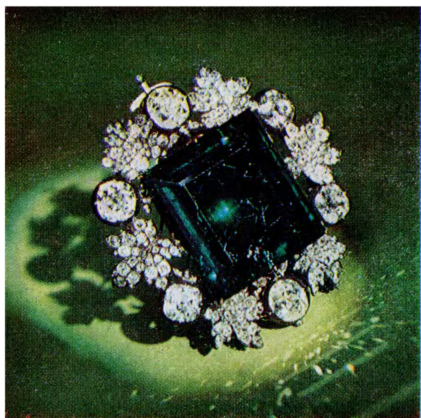


**Апатит**

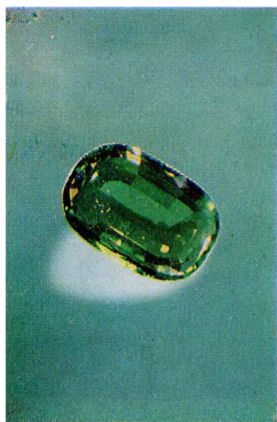


**Лепидолит (литийсодержащая слюда)**





**Брошь с изумрудом  
и бриллиантами**



**Ограненный хризолит**



**Воллостонит**



Шлиф агата



Друза диопсида

Однажды утром Холл вбежал ко мне с радостным возгласом: «Профессор, я получил его!» На протянутой ладони лежало двенадцать маленьких шариков алюминия, самого первого алюминия, полученного электролизом. Это произошло 23 февраля 1886 года». Холлу было всего 23 года.

Когда император Франции Луи Наполеон III впервые увидел металл, похожий на серебро, он приказал обеспечить свою армию алюминиевыми касками, флягами и украшениями. Однако западноевропейская промышленность не смогла выполнить заказ, да и денег на него у императора не хватило бы. Алюминий в те времена ценился, как золото. Пришлось ограничиться изготовлением кирас только для личной охраны императора.

Но блестящее будущее этого металла было очевидно. 100 лет назад Н. Г. Чернышевский сказал, что алюминий — металл социализма.

Сегодня алюминий дороже простой углеродистой стали, но дешевле нержавеющей. Основная статья расхода при производстве алюминия — энергозатраты: 20000 кВт·ч/т. В связи с этим алюминиевые заводы строят, как правило, вблизи крупных электростанций.

В нашей стране первые 8 кг крылатого металла были получены 27 марта 1929 г. В 1932 г. вступил в строй Волховский первый алюминиевый завод, а в 1933 г. — Днепропетровский. В 1939 г. был пущен Уральский алюминиевый завод.

Химическая стойкость алюминия объясняется мгновенным образованием на его поверхности защитной окисной пленки. Это позволяет применять алюминий для теплообменников и других аппаратов химической промышленности, домашних холодильников, радиаторов автомобилей и тракторов. Благодаря высокой отражательной способности алюминия на его основе изготавливают мощные рефлекторы, большие телевизионные экраны, зеркала. Такое свойство, как относительно низкое сечение поглощения нейтронов, сделало алюминий одним из важнейших металлов атомной техники.

Алюминий легок: его плотность 2,7 г/см<sup>3</sup> — почти в 3 раза меньше, чем у стали, и в 3,3 раза меньше, чем у меди. А электропроводность алюминия лишь на одну треть уступает электропроводности меди. Эти обстоятельства и тот факт, что алюминий дешевле меди в 2,5 раза, послужили причиной массового использования алюминия в электротехнике.



Многочисленные достоинства алюминия еще более весомы оттого, что этот металл в высшей степени технологичен. Он прекрасно обрабатывается давлением — прокаткой, прессованием, штамповкой, ковкой. В основе этого свойства — кристаллическая структура алюминия. Его кристаллическая решетка составлена из кубов с центрированными гранями. Металлы, построенные таким образом, хорошо воспринимают пластическую деформацию.

Чистый алюминий непрочен. Но он легко образует различные прочные сплавы.

В начале XX в. были получены первые сплавы семейства дюралюмина на алюминиевой основе с добавками меди и магния. Слово «дюралюмин» происходит от названия германского города Дюрен (ФРГ), в котором было начато промышленное производство этого сплава.

В Советском Союзе в 20-х годах инженер-металлург В. А. Буталов разработал отечественный вариант дюралюмина, названный кольчугалюминием — от названия поселка (ныне города) Кольчугино Владимирской области, где производили кольчугалюминий. Из этого сплава был сделан первый советский металлический самолет АНТ-2 конструкции А. Н. Туполева.

Рост энергетики позволяет увеличивать и производство алюминия. Он уже широко применяется в строительстве. В США даже намечено приступить к серийному строительству алюминиевых городов. Новый проект, предусматривающий возведение целых торговых центров и комплексных жилых домов из этого легкого металла, призван разрешить проблему сбыта алюминия.

### Бокситы на исходе

Традиционный процесс переработки бокситов применяется с начала века почти без изменений. Он хорошо освоен, несмотря на всю его сложность. При получении глинозема используют главным образом метод Байера.

Порошок боксита загружают в автоклав и заливают щелочью при температуре около 200°С и давлении не менее 10 атм. Несколько часов пульпу в автоклаве непрерывно перемешивают струей пара, проходящего сквозь всю ее толщу.

Со щелочью вступает в реакцию не только окись алюминия, но и другие вещества, входящие в состав боксита — кремнезем, окислы титана, ванадия и т. д. Однако большая часть получающихся в конечном результате ве-

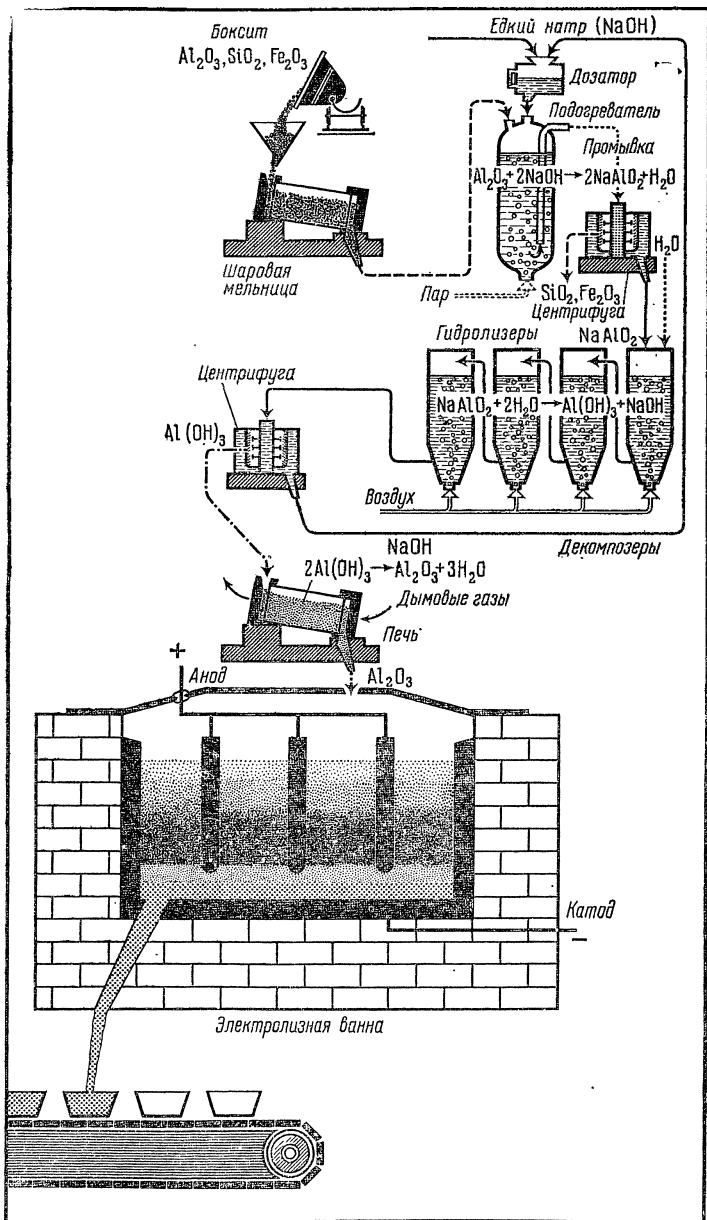


Схема получения алюминия из боксита

ществ остается в твердом осадке. В раствор же переходят соединения алюминия, загрязненные некоторым количеством соединений кремния, фосфора, хрома. Выщелачивание идет непрерывно в ряде автоклавов.

Из варочного автоклава пульпа давлением пара выгружается, давление резко падает, и начинается бурное кипение жидкости. Затем пульпа разбавляется водой, которой промывали твердый остаток — так называемый красный шлам. После разбавления алюминатный раствор отделяется от твердого шлама. Для того чтобы мелкие твердые частицы быстрее отделялись от жидкости, в пульпу добавляют коагулянты — вещества, способствующие слипанию отдельных твердых частиц в крупные хлопья. В качестве такого коагулянта нередко используют обыкновенную ржаную муку. Затем алюминатный раствор фильтруют и направляют на разложение.

Разложение алюминатных растворов осуществляется в гигантских цилиндрических резервуарах, снабженных мешалками, — так называемых декомпозерах. Раствор, имеющий вначале температуру около  $60^{\circ}\text{C}$ , постепенно перетекает по системе сифонов из одного резервуара в другой; засыпаемые в раствор кристаллы гидроокиси алюминия становятся центрами кристаллизации. Процесс кристаллизации, называемый технологами выкручиванием, длится трое — четверо суток.

Конечно, далеко не весь алюминий уходит из раствора. Почти половина его остается в жидкости. Но он не пропадает. Жидкость после отделения от нее выделившейся гидроокиси алюминия возвращается в автоклавы для выщелачивания. Она циркулирует непрерывно, растворяя в автоклавах глинозем и выделяя его в твердом виде в декомпозере.

Последней операцией получения чистого глинозема является кальцинация — обезвоживание полученного вещества. Осуществляется она в гигантских — метров в 50—75 длиной и метра 1,5—2 диаметром — барабанных вращающихся печах. В поднятый конец этой печи-трубы вводят гидроокись алюминия. Она медленно передвигается по наклону печи вниз, навстречу пламени мазутных или газовых горелок. В процессе нагревания и прокаливания до температуры в  $1250^{\circ}\text{C}$  большая часть гидроокиси превращается в безводную окись алюминия — глинозем.

Последний этап всего процесса — получение металлического алюминия из окиси с помощью электролиза.

Окись алюминия растворяют в расплавленном криолите (криолит плавится при температуре ниже  $1000^{\circ}\text{C}$ ).

Процесс электролиза проводят в больших ваннах, выложенных изнутри углем, а снаружи защищенных толстым слоем теплоизоляции. Угольный слой, которым выложена ванна, подключается к отрицательному полюсу и образует большой катод. Электроды, присоединенные к положительному источнику тока, — аноды — изготавливаются из толстых угольных пластин.

Окись алюминия разлагается на положительно заряженный ион алюминия и отрицательно заряженный ион кислорода.

Ионы алюминия движутся к катоду, разряжаются там и превращаются в металлический алюминий. Отрицательные ионы кислорода подходят к аноду, отдают ему свои электроны и становятся свободным газом.

На дне ванны собирается расплавленный алюминий, который периодически выпускают. Режим работы электролизной печи: напряжение 5—8 В, сила тока до 60 000 А.

Залежи богатых бокситов быстро исчерпываются. В годы второй мировой войны, когда многим воюющим странам не хватало алюминия, полученного из боксита, использовали по необходимости и другие виды сырья: Италия получала алюминий из лавы Везувия, США и Германия — из каолиновых глин, Япония из глинистых сланцев и алунита. Но обходился этот алюминий в среднем в пять раз дороже алюминия из боксита, и после войны, когда были обнаружены колоссальные запасы этой породы в Африке, Южной Америке, а позже и в Австралии, алюминиевая промышленность всего мира вернулась к традиционному бокситовому сырью.

Немного на земле элементов, содержание которых в рудах превышает 5%. В нефелине, сопровождающем апатиты, —  $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$  — около 20% алюминия. Конечно, по сравнению с бокситами это немного. Но при комплексной переработке из нефелина можно извлекать множество полезных продуктов.

Комплексным сырьем является и минерал алунит  $\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ . Кроме глинозема, из алунита получают калийные удобрения, серную кислоту и другие химические продукты.

Перспективным алюминиевым сырьем является зола углей теплоэлектростанций — ее образуется в мире около 700 млн т в год. Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в золе колеблется

от 10 до 44%. Минералы алюминия в углях — каолинит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , даунсонит —  $\text{NaAl}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ , полевые шпаты и др. Наиболее перспективно получение из золы кремнеалюминиевых сплавов, абразивов из корунда и карбида кремния  $\text{SiC}$ , а также различных стройматериалов, содержащих алюмосиликаты.

Каолины часто залегают в месторождениях совместно с углем. Они попадают в золу, увеличивая содержание в ней глинозема.

Золу смешивают с известью и содой, спекают при  $1500^\circ\text{C}$ , в результате чего получают силикат кальция и алюминат натрия. Последний выщелачивают и из него добывают алюминий, а оставшийся шлак идет на производство цемента.

## Построено на песке

Он никогда не испытывал ни голода, ни жажды.  
Ему довольно солнечного луча.

*А. Сент-Экзюпери*

## Мир кремния

Кремний — самый распространенный на земле элемент после кислорода: он составляет 26% массы земной коры. Более того, минералы кремния — силикаты, а их сотни наименований, составляют 80% массы земной коры.

Разнообразие соединений кремния определяется способностью его молекул образовывать цепи и каркасы. Как его аналог углерод является основой органического мира, так кремний — основа неорганического мира.

«Показывают мне,— писал академик А. Е. Ферсман,— самые разнообразные предметы: прозрачный шар, сверкающий, как солнце, чистотой холодной ключевой воды, красивый, пестрого рисунка агат, яркой игры многоцветный опал, чистый песок на берегу моря, тонкую, как шелковинка, нитку из плавленого кварца или жароупорную посуду из него, красиво ограненные груды горного хрусталя, таинственный рисунок фантастической яшмы, окаменелое дерево, превращенное в камень, грубо обработанный наконечник стрелы древнего человека... все это одно и то же химическое соединение элементов кремния и кислорода».

Одним из первых предположение о полимерном строении двуокиси кремния высказал Д. И. Менделеев. Имен-

но этим обстоятельством объяснял он летучесть и тугоплавкость веществ состава  $(\text{SiO}_2)_n$ . Рентгеноструктурные исследования подтвердили правильность этой догадки. Установлено, что кристаллический кремнезем представляет собой трехмерный сетчатый полимер. Цепочка кремнекислородных тетраэдров очень прочна, связь кремния с кислородом намного прочнее, чем, например, связь между атомами углерода в цепях органических полимеров. Кремнекислородные цепи образуют жесткие сплетения в виде пространственных решеток и сеток, которые хрупки, неподатливы при механической обработке.

Несмотря на распространенность в природе, этот элемент открыли сравнительно поздно. В 1825 г. выдающийся шведский химик и минералог Йенс Якоб Берцелиус восстановил металлическим калием газообразное вещество, известное ныне как тетрафторид кремния  $\text{SiF}_4$ . Новый элемент был назван силицием.

### Обыкновенный песок

Песок состоит из кремнезема — двуокиси кремния —  $\text{SiO}_2$ , на долю которого приходится 12,6% массы земной коры. Кремнезем в виде огромных масс песка находится в пустынях, по берегам рек, морей и океанов. Желтоватым и коричневатым цветом песок обязан примесям окислов железа.

Двуокись кремния имеет 12 кристаллических модификаций. Из них наиболее распространенной является кварц. Кроме того, существуют не кристаллические, а стеклоподобные модификации, в том числе в природе встречаются лешательерит (кварцевое стекло) и опал, состоящий из тончайших частичек двуокиси кремния, также не образующих кристаллов.

Другие модификации кремнезема, имеющие ту же химическую формулу, но иное кристаллическое строение, — тридимит и кристобалит — встречаются гораздо реже кварца. Они неустойчивы в присутствии воды, но в безводных условиях могут сохраняться сколь угодно долго. Кристобалит и тридимит найдены в породах Луны, возраст их определен в 3 млрд лет.

В древности кристаллы кварца рассматривались как особая форма льда. Лед по-гречески «кристаллос», отсюда название прозрачных кристаллов кварца — горный хрусталь. Этот минерал применяется в оптике, а также в пьезоэлектрических приборах. Удивительное свойство

кристаллов кварца — поляризоваться под давлением и деформироваться под действием электрического поля — нашло широкое применение не только для измерения давления. Когда требуется создание колебаний высокой частоты, воздействуют высокочастотным электрическим полем на кварц. Так возникли кварцевые генераторы ультразвука, акустические и другие приборы.

Кварц — основной компонент стекла. Различные стекла содержат от 40 до 80% кварца, а специальные кварцевые — 96—100%. Для использования кварца в стекловарении производится его обогащение — отделение от полевых шпатов и других пород, а также от окислов железа. Кроме промывки водой и кислотой, для обогащения кварца применяется флотация, но вначале в мельницах производят обдирку и оттирку минералов.

При обогащении россыпных месторождений кварцевый песок часто оказывается отходом производства. Так, например, украинские титаноциркониевые пески, перерабатываемые Верхнеднепровским горно-металлургическим комбинатом, после извлечения тяжелых минералов титана (рутила и ильменита), циркона, магнетита и других представляют собой прекрасный кварцевый концентрат. Он направляется 160 предприятиям, использующим кварцевый песок в качестве сырья для производства стекла, в литейном деле, для производства стройматериалов и т. д.

### Богатые родственники песка

Кристаллы кварца состоят из тетраэдров, в центрах которых находится ион кремния, а в вершинах — 4 иона кислорода. Тетраэдры  $\text{SiO}_4$  так тесно связаны друг с другом, что в небольшие пустоты могут поместиться в виде изоморфных примесей только легкие ионы с малым радиусом: лития, натрия, алюминия, иногда железа. За блеск, прозрачность, разнообразие кристаллических сростаний разновидности кварца ценятся как прекраснейшие поделочные и драгоценные камни, обладающие твердостью, стойкостью, соперничающие с другими камнями более сложного состава.

Бесцветность чистого кварца позволяет ничтожным примесям окрашивать его в фиолетовый, желтый, синий и любые другие цвета вплоть до черного. В некоторых кристаллах образуются пронизывающие их внутренние прозрачные волокна, создающие эффект «копачьего глаза».

Наиболее ценным из ювелирных камней группы кварца является фиолетовый аметист.

На поверхности Земли окись кремния кристаллизуется в форме тонковолокнистых натечных агрегатов, называемых халцедоном. По характеру окраски и форме натечков различают большое количество поделочных разновидностей. Иногда в толще пород и в трещинах окись кремния выпадает в виде неокристаллизованного аморфного геля (студия) — опала. Кристаллический кварц из водных растворов способен цементировать различные осадочные породы и замещать их. При этом образуются плотные яшмовые породы.

Название «аметист» происходит от греческого слова, переводимого как «непьяный». Его, очевидно, дали этому камню на основании ошибочного верования в то, что носящий этот камень не подвержен опьянению даже при неводержанности в употреблении крепких напитков. Плиний выдвигает другое объяснение, а именно, что цвет аметиста приближается к цвету вина.

Кристаллы аметиста растут ромбовидными щетками на непрозрачной кварцевой подложке. Окраска как бы концентрируется на остриях головок, она имеет радиационное происхождение. Некоторые аметисты на свету бледнеют, но при радиоактивном облучении окраска вновь восстанавливается.

Месторождения аметиста есть в Бразилии, Уругвае, на Мадагаскаре. В СССР аметист встречается на Урале и на Кольском полуострове.

«Цитрин» — желтая разновидность кварца. Его название происходит от французского слова *citron* (лимон). Пока не была расшифрована природа минералов, желтый кварц путали с желтым топазом. Ювелиры настоящий топаз отличали прибавлением определения «бразильский». Путаница усугубилась, так как и желтый кварц, и желтый топаз в изобилии найдены в Бразилии. Цитрин встречается у нас на Урале, но дымчатым топазом здесь называют более темный кварц.

Дымчатый кварц с неравномерной окраской называют раухтопазом, а совсем черные разновидности — морионом.

Розовый кварц, как указывает название, имеет розово-красную или розовую окраску, выцветает на сильном солнечном свете. Эта разновидность кварца редко образует ограненные кристаллы, лишь частично просвечивает и почти всегда иссечена трещинами. Часто наблюдается



астеризм — радиально-лучистые световые разводы (от греч. «астер» — звезда). Склеиванием звездчатого кварца с подложкой из синего материала получается имитация звездного сапфира. Путем растворения кварца было доказано, что астеризм возникает из-за присутствия в нем мелких иголочек рутила. Они могут быть различным образом ориентированы, вызывая иногда эффект колец света в дополнение к главной звезде.

Цвет минералов может быть вызван присутствием элементов-примесей, входящих в структуру кристалла либо вместо атомов главных элементов, либо в промежутках между ними. Цвет аметиста раньше объясняли присутствием марганца, а цвет розового кварца — марганца или титана. Однако спектрографическое изучение не подтвердило это предположение. В аметисте были обнаружены примеси алюминия, хрома, меди и очень мало марганца и титана. Измерения, проведенные на серии образцов дымчатого кварца и аметиста из ряда японских месторождений, показали, что густота окраски пропорциональна содержанию железа.

Существует и другой способ возникновения окраски, а именно возникновение центров окраски как дефектов структуры, образующихся под воздействием радиоактивного излучения. В природных окрашенных кристаллах цвет предположительно обусловлен воздействием небольших доз радиоактивного облучения, исходящего от вмещающих горных пород.

Тепловое воздействие обычно вызывает ослабление окраски; если оно протекает достаточно долго, а температура достаточно высока, то оно ведет и к полному исчезновению цвета. Так, цитрин теряет окраску при слабом нагревании, аметист — при более сильном, а розовый кварц — при красном калении. При более слабом нагревании аметист меняет окраску на густо-оранжевую. Кварц, приобретший желтую окраску при нагревании, отличается от природного желтого цитрина отсутствием дихроизма; цитрин же неизменно характеризуется хотя и слабым, но отчетливым дихроизмом. После того, как случайно обнаружили, что некоторые бразильские аметисты под воздействием нагревания могут превращаться в прозрачные зеленые камни, процесс нагревания проводили умышленно и получали материал, продававшийся под названием «празиолит».

Облучение возвращает цвет обесцвеченному кварцу; при этом новый цвет не обязательно будет таким же, как

утраченный. В большинстве случаев такой кварц становится дымчатым или черным, хотя небольшая доля кристаллов приобретает окраску цитрина. При повторном нагревании некоторых камней наблюдается быстро исчезающая голубая окраска. Настоящего аметистового цвета не возникает, хотя имеются сообщения о синтезе аметистов при росте кристаллов кварца в стальных автоклавах.

Иногда кварц кристаллизуется, захватывая и включая ранее образовавшиеся минералы. Он может включать массивный светлоокрашенный волокнистый материал и в таком случае имеет переливчатую окраску. Такие камни, обработанные в виде кабошона, обнаруживают красивый эффект «кошачьего глаза». Кварцевый «кошачий глаз» не обладает опалесценцией, свойственной хризоберилловому «кошачьему глазу». Когда включения представлены крокидолитом — разновидностью асбеста, первичный синий цвет которого изменен в результате окисления до красивого золотисто-коричневого, камни получают название «тигрового глаза». Иногда крокидолит подвергается окремнению без изменения синей окраски; такие камни известны как «сапфир-кварц», «соколиный глаз». Празём, или «мать изумруда», как его называли, полагая, что он является материнской породой для изумрудов, — это кварц, окрашенный в луково-зеленый цвет благодаря включениям волокон актинолита (кальциево-магнезиевого силиката). Слово «празём» в переводе с греческого означает лук. Это название употребляют также по отношению к сходно окрашенным микрокристаллическим агрегатам кварца (халцедонам). В чистый прозрачный кварц иногда включены тонкие волосяные кристаллы рутила, так называемые «стрелы Амура». Иногда включения представлены пластинками слюды, гематита или других чешуйчатых минералов. Такие камни с живописными блестками напоминают стекло, содержащее кристаллы меди и называемое «авантюрин» — в переводе с итальянского — случай. Полагают, что этот материал впервые был получен случайно, когда некоторое количество медных опилок попало в сосуд с расплавленным стеклом на стекловарне в Мурано близ Венеции.

Одним из сокровищ Геологического музея в Лондоне является огромная ваза из авантюрина с подставкой из серого порфира. Русский император Николай I подарил ее сэру Мурчисону — директору Геологической службы, который завещал ее Геологическому музею.

Тонкокристаллические кремнеземы с размером кри-

сталликов в доли микрона, образующие натечные агрегаты с тусклым блеском, называются халцедоном. Название происходит от античного города в Малой Азии — Халкедона. В группу халцедона входят опал, агат, оникс, хризопраз, карисол, сардер и другие полудрагоценные камни.

Опал в древности вызывал восхищение. Вот как описывал его Плиний: «Из всех драгоценных камней именно опал вызывает наибольшие трудности при описании. Для него свойственна острая игра света карбункула, фиолетовый отблеск аметиста, аквамаариновые тона изумруда — смешанные все вместе и сияющие с неопишуемой яркостью».

«Нет камня, который мошенники подделывали бы с большим искусством, чем этот. Единственным средством, позволяющим выявить обман, является солнечный свет. Если поддельный опал (изготовленный из стекла) взять большим и указательными пальцами и позволить лучам солнца падать на него, то он обнаруживает одну и ту же окраску по всей поверхности камня и не излучает сияния. В то же время истинный опал излучает последовательно различные яркие лучи, окраска его постоянно меняется, и он отбрасывает яркие отблески на пальцы».

Когда-то считалось, что опал предвещает несчастье тому, кто его носит. Но вот в Австралии обнаружили черный опал. Малиновое сияние, пробежавшее временами по куску черного, как ночь, камня, было настолько восхитительно, что суеверное недоверие к опалу забыли.

В экономике Австралии эта разновидность кремнезема играет огромную роль, являясь одним из важнейших предметов экспорта: в 1975 г. в стране было добыто опала на сумму 23 млн австралийских долларов (примерно 19 млн руб.).

Опал образуется при выветривании песчаников и сланцев. Встречаются два типа месторождений: валунный и песчаниковый. В первых ожелезненные и каолинизированные пески содержат эллипсоидальные железистые конкреции размером 2,5—7,5 см в поперечнике (австралийское название «орехи Йоах»). Опал в этих конкрециях может присутствовать в центре и между концентрическими слоями. В других случаях он выполняет не только концентрические, но и радиальные трещины. В песчаниковых месторождениях опал присутствует как основная масса в слое железистых песчаников, залегающих выше слоя железняка.

В Южной Австралии известны такие крупные месторождения, как Андамука и Кубер-Педи.

Кубер-Педи переводится как «белый человек в яме». Так в первой четверти нынешнего столетия называли это место аборигены. Вся эта пустынная территория изрыта глубокими колодцами: одни заброшены, а в других копошатся люди, вооруженные кирками и молотками. Колодцев здесь много, потому что копают наугад. «Опалы не железо, — шутят старатели, — геологи здесь не помогут. Единственно верный способ напасть на правильное место — это снять шляпу и бросить ее через плечо. Где она упадет, там и надо искать».

Электронные микрофотографии благородного опала показали, что слагающие его кремниевые зерна мелкие и строго закономерно располагаются в пространстве, образуя правильную сетку. Именно правильностью строения благородного опала объясняется, что он действует на световой луч подобно дифракционной решетке. Эта решетка разлагает луч на все цвета радуги, и отдельные лучи, отражаясь от зерен, создают замечательную игру разноцветных блесков.

Как только природа благородного опала была установлена, начались опыты по получению синтетического камня.

Сначала получают большое количество мелких опаловых шариков строго одинакового размера. Для этого используются силиконовые эфиры или органические соединения кремнезема. Эмульсию эфира разлагают аммиаком, при этом осаждается гель кремнекислоты. Так как каждая капля эмульсии самостоятельна, то образуется серия кремниевых шариков. Далее необходимо несколько обезводить шарики, рассеять их, отделить неправильные агрегаты и шарики с пустотками, а после цементировать их обжигом до  $500-800^{\circ}\text{C}$  или новой порцией геля кремнекислоты.

Агат — древнейший поделочный камень. Яркоокрашенные или узорчатые полупрозрачные камешки издавна собирали в речном галечнике. Иногда вода их так отполировывала, что достаточно было просверлить в камнях отверстия, нанизать их на нитку — и ожерелье готово.

Агат — концентрический, тонкослоистый камень, каждый слой которого сложен разноокрашенным халцедоном с перпендикулярным слою расположением волокон. Обычный агат — чередование серо-голубых полупрозрачных слоев с белыми, почти непрозрачными,

Сердолик — более или менее однородный халцедон, окрашенный в красный или буро-красный цвет. Карнеол — красный сердолик, сардер — бурый или красно-бурый, хорошо просвечивающий. Оникс — агат, в котором чередуются бурые или темно-бурые, почти черные слои с белыми и желтыми. Чем разнообразнее, контрастнее и топыше слои, тем ценнее камень. На ониксе обычно вырезают камеи, причем художник использует не только рельеф, но и окраску слоев. При изготовлении поделок особенно важно направление, в котором разрезается ониксовый желвак, — необходимо подчеркнуть слоистость и узор оникса.

Халцедоновые и агатовые гальки можно собирать в Кобулети и в районе Карадага в Крыму. Одна из бухт даже называется Сердоликовой. По свидетельству А. Е. Ферсмана, в начале XX в. в Коктебеле была мастерская чеха Яромира Тиханека, где из местных камешков изготовлялись бусы, запонки, булавки, броши, причем Тиханек владел и искусством подкрашивания агата.

Сейчас красивые камни в бухте Коктебеля — большая редкость. Но увидеть их можно. На могиле поэта и художника Максимилиана Волошина, который жил и умер в этих местах, собраны эти камни.

Крупное месторождение поделочного агата расположено в Иджеванском районе Армении, где в мощной вулканогенной толще черные слои плотных андезитовых лав чередуются с туфовыми, более пористыми пластами. Слои лав богаты незакристаллизованным стеклом, но особенно его много в туфе, который застыл гораздо быстрее, чем лава. Сейчас среди мощных глиняных толщ, которые представляют собой полностью измененные и превращенные в глину лавы и туфы, стоят крупные черные скалы — глыбы лавы, не успевшие измениться. Всякая пустота в глине (жеода) близ сохранившихся неизменных пород и в лавах выполняется халцедоном. Если пустота большая и края ее уже оделись корочкой халцедона, то раствор проникает в нее медленнее и внутри жеоды образуются более крупные агатовые и кварцевые кристаллы.

Известны месторождения агата и в других областях развития вулканических пород. Так, в конце 70-х годов на северо-востоке Якутии в галечнике р. Седедема, которая впадает в р. Колыму, были встречены валуны и гальки агата, сардера, оникса и кроваво-красных карнеолов иногда с кристаллами кварца в центре. Агат и хал-

цедон здесь вымываются из меловых лав (образованных примерно 100 млн лет назад), развитых на водоразделах Алазейского нагорья.

Агат и другие кремнистые камни были первыми материалами, из которых человек на заре своей истории изготавливал печати и резные украшения (геммы). Камни с резным узором — италии — использовались главным образом как печати, а с выпуклым изображением — камеи — еще за 30 веков до н. э. (эгейская культура) — в качестве украшений. Изготовлением резного камня занимались греки. Они работали с агатом, сердоликом и яшмой. Камнерезное искусство достигло расцвета на о-ве Крит в XVII—XV вв. до н. э.

В Эрмитаже находится знаменитая камея Гонзага — одна из самых больших в мире: ее длина 157 мм, ширина 118 мм, высота рельефа 30 мм. Выполнена она из единого куса трехслойного сардоникса — агата с чередующимися слоями коричневого и белого цвета. Фон камеи темно-коричневый. Из среднего, молочно-белого слоя вырезана фигура женщины, из более ровного и светлого участка слоя — лицо мужчины.

По характеру работы и имеющимся аналогам специалисты установили, что камея выполнена в Египте, вероятнее всего в Александрии. Здесь при дворе первых Птолемеев была мастерская для производства камеи.

Ранняя история камеи полностью не ясна, известно только, что в средние века ею владели герцоги Мантуи Гонзаги. В 1630 г. Мантуя после длительной осады была взята и разграблена австрийцами. Камея оказалась в Праге в сокровищнице короля Рудольфа II, однако в 1648 г. Прага была взята шведскими войсками. В списке драгоценностей шведской королевы Христины появилась и эта камея. В 1654 г. королева Христина приняла католичество, и, отказавшись от шведского престола, переехала в Рим, взяв с собой камею. После смерти Христины камея была приобретена герцогом д'Одескальчи и в числе других драгоценностей этого рода в 1794 г. продана Ватикану, где была внесена в инвентарную опись. В 1803 г. эта камея оказалась в Париже у жены Наполеона, императрицы Жозефины. Пути, которыми она попала из Рима в Париж, не ясны, но можно предполагать, что вместе со многими драгоценностями Ватикана она была вывезена из Рима в 1794 г., когда французская армия отступала под натиском армии Суворова. Впоследствии Жозефина подарила камею Александру I. С 12 октября 1814 г. она хранится в Эрмитаже.

## Странные камни

Всякая вещь есть форма беспредельного разнообразия.

*Козьма Прутков*

Самые распространенные элементы в земной коре металл (алюминий) и неметалл (кремний) дают огромное количество сочетаний в виде разнообразных кристаллических структур: от простых глин и горных пород до удивительных минералов с уникальными свойствами — слюды, каолинов, полевых шпатов и т. д. Эти минералы находят применение не для извлечения содержащихся в них компонентов, а сами по себе, благодаря своим уникальным свойствам.

### Минерал в окне

В XVI в. побывавший в России немец Г. Штаден писал: «Камень этот разрывается на тонкие листы, а потом из него делают окна. По-русски это называется слюда». Добывали слюду только крупную, широколистную на Кольском полуострове. Нашли ее и в Сибири за р. Алдан в 1656 г. якутские служилые люди Никита Солдатов и Лука Морозов.

Необыкновенный камень стоил дорого и украшал окна лишь царских дворцов да боярских теремов. Но камни, как и люди, подвержены превратностям судьбы. Мог ли кто подумать еще в конце прошлого века, хоть и богатого научными открытиями, что когда-либо возродится промысел слюды, казалось, навеки погибший по причине появления стекла?

Проходили десятилетия — заброшенные слюдяные выработки заболачивались, затоплялись, копи рушились и зарастали кустарником и лесом. Забыли и в Западной Европе широколистную олонецкую слюду, названную «московитом», затем измененную на «мусковит». Только в архивных документах знаменитого Соловецкого монастыря да в специальной литературе хранилось это слово. На Соловках одна из монастырских башен названа Слюдяной — в ней под семью замками хранился «прозрачный камень».

Мусковит — тяжелый слоистый минерал, способен легко расслаиваться на тонкие листочки слюды. Из этих листочков изготавливают детали необходимой формы для электронных ламп, радиодетали и другие электротехни-

ческие приборы и аппараты. Сейчас конденсаторная слюда и коллекторный слюдопласт Петрозаводской фабрики известны всем электротехническим предприятиям страны. Так слюда, пройдя через века, побывав в фаворе и в забвении, вновь предстала перед людьми, обретая новую значимость и новую ценность.

Литийсодержащие слюды — лепидолит и циннвальдит служат источником лития. Известны ванадиевая и хромовая слюда, железистые черные слюды — флогопит и биотит. В строительстве применяется легко вспучивающаяся при нагревании слюда — вермикулит. Он относится к группе гидрослюд, содержащих межслоевую воду. При температуре 900—1000°C под действием испаряющейся межслоевой воды объем вермикулита увеличивается в 15—20 раз и образовавшиеся прослойки воздуха обеспечивают низкую плотность, тепло- и звукоизолирующие свойства. Из слюд этого типа получают звукопоглощающие материалы, легкие вермикулитобетоны, штукатурные растворы, наполнители резин, пластмасс и красок. Вермикулит не поддается истиранию и по смазочным свойствам подобен графиту, благодаря чему применяется в антифрикционных материалах.

Крупные кристаллы слюды до последнего времени извлекались вручную. Но есть и механические способы обогащения крупнокусковой слюды. Если поместить слюдяную руду на наклонную плоскость, округлые изометрические куски породы легко скатятся с нее и отлетят далеко, а плоские куски слюды будут медленно скользить и остановятся, как только кончится наклон. Этот процесс разделения интенсифицируется, если наклонная плоскость подвергнута вибрации.

Мелкоразмерные слюдяные частички могут извлекаться в пневматических аппаратах. Песчинки падают в восходящих потоках воздуха, а слюдинки «витают» и отсасываются. Совсем тонкие мелкие частички легко флотируют с применением катионных собирателей типа аминов.

Топкая, даже специально молотая слюда широко применяется в качестве наполнителя при производстве пластмасс, резинотехнических изделий, бумаги, красок, специальных цементов, плиток и других строительных изделий.

...Еще в 40-х годах начали на Алдане добывать слюду высокого качества. Но в последние два десятилетия спрос на продукцию комбината падает. Химия предложила промышленности заменители природной слюды. Спрос на



слюду крупных фракций — наиболее дорогую, а значит, и наиболее выгодную — упал. И тогда появилась идея использовать сопутствующую слюде породу\*.

Диопсиды — породы, содержащие слюду. Их и добывали попутно со слюдой. Сегодня 9 млн т этого сырья лежит в отвалах на рудниках комбината. Если расплавить диопсид, из него можно получить прекрасный утеплитель. Если применить его в сочетании с бетоном, стены домов на Севере «похудеют» в 2,5–3 раза. Из материалов с применением диопсида получают керамическую плитку, каменное литье, минеральную вату, пеностекло. Компоненты из диопсида улучшают качество обмазки сварочных электродов.

На особые свойства диопсида как-то обратили внимание... голуби. Птицы игнорировали кучки других материалов, насыпанных в институтском дворе, а клевали только алданский диопсид. На Тольяттинской птицефабрике диопсид добавляют в корм курам, в результате чего улучшается сохранность поголовья и птицы прибавляют в массе.

В Якутском НИИ сельского хозяйства пробуют добавлять диопсид в минеральные удобрения. Получены опытные партии пеподиопсида.

Множество новых разнообразных материалов можно получить из слюды. Слюда переживает свое третье рождение.

### Горная кудель

Существует легенда, о том как промышленник Акинфий Демидов привез в подарок Петру I с Урала чудесную скатерть белого цвета. Во время трапезы лукавый заводчик опрокинул на скатерть тарелку супа и вылил стакан густого заморского ликера. Потом бросил скатерть в камин и, достав ее из огня, показал царю, что на ней нет ни единого пятнышка. Скатерть была соткана из асбеста.

Асбест — тонковолокнистый минерал, водный силикат магния и железа — получил свое название от греческого слова «несгораемый». Хризотил-асбест плавится только при 1500° С. Зеленовато-серые шелковистые волокна асбеста могут расщепляться до толщины менее микрона, обладая прочностью около 300 кг/мм<sup>2</sup>, т. е. в 1,5–2 раза прочнее стали.

---

\* Бородин О. Беды волшебного диопсида//Известия. 1987. 17 марта.

Уникальные свойства асбеста были известны издавна. Древнеримский историк Плиний писал: «Есть камень для ткани, который растет в пустынях Индии, обитаемых змеями, где никогда не падает дождь, и потому он привык к жару. Из него делают погребальные рубашки, чтобы заворачивать трупы вождей при сожжении их на костре; из него делают для пирующих салфетки, которые можно раскалять на огне». В начале XVIII в. из асбеста стали делать фитили для лампад и бумагу в Венгрии, на Пиренеях. В 1785 г. в Швеции проводились опыты по использованию асбеста для строительства огнестойких сооружений.

Красота минерала вызвала восхищение великого скульптора Микеланджело. Когда ему подарили обломок редкого камня, он воскликнул: «Это же настоящие волосы Венеры!» Неизвестно, какое произведение искусства сотворил бы художник Возрождения, если бы получил чудесный материал в достаточном количестве. В 1806 г. итальянка Елена Перпенти получила почетную медаль Общества поощрения промышленности за сотканые ею кружева из чистых асбестовых волокон.

Кроме огнезащитных тканей и строительных деталей, таких, как асбоцементные трубы, шифер, асбест применяется в радиоэлектронике, машиностроении, химической промышленности, как наполнитель пластмасс, резины, специальных сортов бумаги, картона, фильтров и т. д. Асбестовые фильтры, имея 200 млн отверстий на см<sup>2</sup>, способны очищать жидкость даже от бактерий.

На Урале хризотил-асбест был обнаружен в 1720 г. на р. Тагил крестьянином Невьянского завода Сафроном Согрой. Сейчас разработки Баженовского месторождения — одного из крупных в мире — дают почти 40% мирового производства. Месторождение было открыто в 1885 г. землемером А. П. Ладыжинским при отводе участков для золотых приисков на речке Грязнушке. Здесь, неподалеку от Свердловска, вырос новый город Асбест.

Асбестовую руду добывают в открытом карьере, обогатительная фабрика использует уникальный, единственный в своем роде процесс воздушного обогащения. Руда дробится и подвергается грохочению много раз подряд, и на каждой стадии с поверхности грохота отсасываются распушенные асбестовые волокна. Распушенное волокно имеет плотность менее 1 г/см<sup>3</sup>, а порода — около 2,5. Обогащение происходит как на грохоте, где длинные волокна остаются на сите, а изометрические частицы

породы уходят под решето, так и в воздушном потоке в соответствии с плотностью частиц.

Обогащение по плотности производится в пневматических центробежных сепараторах. Они представляют собой пневмоциклоны, аналогичные гидроциклонам. Кроме того, горизонтальная воздушная струя может выдувать волокна асбеста из вертикально падающей руды — это воздушно-проходные сепараторы.

Все здание фабрики находится под постоянным вакуумом, так как вся пыль и волокно непрерывно отсасываются и осаждаются в пневмоциклонах. Влажность руды, поступающей на обогащение, не более 2%, так как она высушивается при 500–600° С. После сушки руда охлаждается на складе несколько суток, чтобы прочность волокон восстановилась после нагрева. Дробление и обогащение производятся в 5–7 стадий. Затем специальные автоматы прессуют и пакут асбест по сортам (по длине волокон).

Второе по значению месторождение асбеста в СССР Ак-Довурак расположено в Туве. Комбинат Туваасбест дает продукцию высших сортов. Советский асбест экспортируется во многие страны мира.

### Сито для молекул

Цеолиты — группа не слишком часто встречающихся в природе минералов-алюмосиликатов — состоят в основном из самых распространенных на земле элементов: кислорода, кремния и алюминия. Их кристаллическая структура образована регулярным сочетанием тетраэдров  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  и  $[\text{AlO}_4]^{5-}$ , соединенных общими кислородными вершинами в трехмерный каркас, пронизанный тончайшими (3–10 Å) полостями и каналами. Поскольку заряд алюминия на единицу меньше, чем кремния, компенсация заряда происходит за счет катионов щелочных и щелочноземельных металлов, в основном Na, K, Ca, Ba, Mg. Кроме того, в полостях находятся молекулы воды, а также соединения аммония и некоторые его органические производные.

Свойства цеолитов оказались столь важными и ценными, что сейчас уже ведутся работы по специальному синтезу искусственных цеолитов: подбираются специальные катионы, регулируются размеры полостей в сторону их увеличения (до 15–35 Å) и количество воды в кристалле.

Свое название цеолиты (в переводе с греческого — «кипящие камни») получили благодаря способности вспучиваться при нагревании из-за «вскипания» расположенной в их полостях воды. Неподвижные кристаллические каркасы «оживают», изменяются углы сочленения тетраэдров, размеры полостей и каналов; ионы, находящиеся не только в полостях, но и в основании каркасов, могут поворачиваться и смещаться в кристалле на 2—3 Å. При этом устойчивость каркасной структуры не нарушается. Дегидратация цеолитов обратима: выпанная нагреванием до 200—400° С или вакуумированием вода снова жадно поглощается цеолитом после охлаждения. На этом основан метод осушения природного газа и обезвреживания органических жидкостей, например спирта, молекулы которых из-за своей величины не могут проникнуть внутрь молекулярного каркаса.

Четкая повторяемость параметров каркаса придает ему свойство молекулярного сита. На таком сите можно, например, отделить кислород с величиной молекулы 2,8 Å от азота, молекула которого чуть потолще — 3 Å. Можно отделить и полярный кислород от инертного аргона.

Самое важное свойство цеолитов — способность к обратимому ионному обмену катионов, находящихся в структуре алюмосиликатного каркаса. У каждого цеолита имеется определенный ряд замещения, и это позволяет улавливать достаточно полно и чисто определенные виды ионов из растворов. В том числе радиоактивных ионов.

Цеолиты применяются как селективные адсорбенты и катализаторы, для очистки воды, нефти, газов, осушки фреонов, создания глубокого вакуума. Механизм действия цеолитов был подробно изучен в Институте геологии, геофизики и геохимии СО АН СССР И. А. Белицким и др. При этом обнаружилось еще одно интереснейшее их свойство.

Еще в середине XIX в. сосланный в Сибирь за участие в Польском восстании 1863 — 1864 гг. геолог А. Л. Чекаповский описал странный обычай камчадалов поедать весной «земляную сметану», состоявшую, по его данным, из смеси каолина и цеолита. Обычай есть землю, как оказалось, весьма полезен, особенно после потребления нерпичьего жира, и предохраняет от изжоги.

В 1922 г. сибирский геолог П. Драверт обнаружил и исследовал явление «камнеедения» — литофагии — у маралов, лосей, волков. Первоначально считалось, что это-

ри едят солонцы. Но исследование свыше 300 «солонцов» в тайге показало, что это цеолиты. В местах камнеедения животных, сопоставив старинные якутские названия земель в районе Охотска, такие, как «земляная сметана», «каменное масло», В. И. Бгатов предсказал месторождения цеолитов\*.

В Киргизии Бгатов столкнулся с любопытным фактом. На свиноводческой ферме в Чуйской долине старые заборы — дувалы — заменили современной железобетонной оградой. Вскоре свиньи без видимых причин стали хиреть. Оказалось, глина, из которой сооружали традиционные дувалы, служила им чем-то вроде сорбционного средства. В глине не было соли. Значит, наряду с солонцами, содержащими хлористый натрий, существует и другая «съедобная земля», потребляемая животными. Инстинкт подсказал свиньям один из таких «несоленых» солонцов. Но у диких животных этот инстинкт намного сильнее.

В Приморской тайге охотники и лесники давно отметили любовь оленей к определенным лесным уголкам. Звериная тропа привела на поляну, сплошь «перепаханную» лакомившимися животными. Сантиметров на тридцать земля просто съедена. Исследование показало: в поедаемых оленями цеолитизированных туфах количество цеолитов составляет до 70% массы.

Широкое применение цеолитов в животноводстве обещает значительный эффект. Опыты, проведенные на коровах, свиньях, курах, показали значительный прирост массы, плодовитости и выживаемости животных. Цеолиты могут использоваться при создании грунтов в теплицах, подкормке рыб, очистке питьевой и сточных вод. Не исключено использование цеолитов в медицине.

---

\* Зенков А. Геологи спешат за оленем//Известия. 1985. 10 марта.

## Заключение

История минералов, их роль в науке, промышленности, культуре — тема необъятная, и эта книга представляет собой всего лишь серию очерков о некоторых представителях замечательного царства. Мы постарались показать различные аспекты взаимосвязи царства минералов с человеческим обществом.

Происхождение (генезис), физические свойства и кристаллохимическое строение минералов в связи с технологиями извлечения их из руд и дальнейшим использованием в промышленности — предмет технологической минералогии — нового направления учения о минералах.

Сейчас, с бурным развитием промышленности, нуждающейся во все большем количестве исходных материалов, более того, требующей от них новых свойств, технологическая минералогия становится важнейшей областью современной науки. Поэтому наряду с драгоценными камнями большое внимание в книге уделено их «непопулярным» и «незаметным» аналогам, которые являются важнейшим минеральным сырьем — источником металлов, стройматериалов, топлива. В современном мире промышленные минералы играют более важную роль, чем их ювелирные собратья, и заслуживают не меньшего интереса. В конечном счете успехи кристаллохимического синтеза минералов позволяют считать драгоценные камни понятием не столько эстетическим, сколько психологическим — ведь их ценность определяется в первую очередь уникальностью камня.

Интересен путь в современное промышленное производство многих минералов, имевших некогда лишь эстетическую ценность и соответствующую экономическую оценку, переход к их промышленной ценности с соответствующим ростом масштабов добычи. Таков путь алмаза, изумруда—берилла, группы корунда—бокситов, минералов группы двуокиси кремния и др. Назрела необходимость создания новой классификации минералов, в которой следует придавать основное значение таким параметрам, как технология извлечения и переработки, химическая

структура, физические свойства, и которая должна служить конечной цели поиска, добычи и извлечения минерала — его промышленному освоению.

«Начиная с истоков человеческой культуры вплоть до текущих дней,— писал академик А. Е. Ферсман,— камень сопровождал человечество, запечатлевая стремления целой эпохи, отражая ход мировой истории. Камень был не только пассивным соучастником человеческой жизни, он пробуждал мысли и чувства человека, давал направление изобразительному искусству и пищу поэзии». Таким образом, минералогия, технология добычи, обработки и переработки минералов, направления их использования в какой-то степени определяют уровень культуры и промышленного производства в стране.

Небольшой объем книги не позволил рассмотреть многие интереснейшие минералы. Все они имеют оригинальную историю и применяются в промышленном производстве. В современном мире уже не осталось бесполезных минералов — все нашли применение. На повестке дня — безотходная технология, новый этап в истории минералов и руд. Почти не затронут ряд интереснейших областей: методы современного инструментального анализа, синтез минералов, информационно-поисковые системы минералогии, автоматизированное проектирование технологий переработки минерального сырья. Да мало ли вопросов, имеющих отношение к царству минералов! Все же автор будет считать свою задачу выполненной, если приоткрыл для читателя окно в этот прекрасный, удивительный и загадочный мир.

## Указатель минералов, руд и химических элементов

- Авантюрит  $\text{SiO}_2 \cdot \text{Cu}$  139  
 Агат  $\text{SiO}_2$  134, 140–143  
 Азурит  $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$  64  
 Аквамарин  $\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$  11, 50, 86, 90  
 Актинолит  $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5(\text{OH, F})_2 \cdot [\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$  139  
 Александрит  $\text{Al}_2\text{BeO}_4$  86, 91  
 Алмаз C 5, 8, 9, 25, 38–50, 91, 125, 151  
 Алузит  $\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$  10, 133  
 Альбит  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  16  
 Алюминий Al 11–14, 17, 19, 22, 61, 92, 97, 98, 123–134, 136, 138, 144, 148  
 Аметист  $\text{SiO}_2$  48, 137–140  
 Анортит  $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$  16  
 Антимопит  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  63  
 Апатит  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F, OH})$  9, 15–17, 65, 81, 98, 99–101  
 Арсенопирит  $\text{FeAsS}$  8, 64  
 Асбест 10, 103, 139, 146–148  
  
 Барий Ba 9, 12, 148  
 Барит  $\text{BaSO}_4$  10, 54, 57, 63  
 Берилл  $\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$  81, 86, 88, 89, 92–95, 99, 151  
 Бериллий Be 9, 10, 12, 15, 17, 61, 80, 81, 86, 88, 89, 92–95, 98  
 Берtrandит  $\text{Be}_3(\text{OH})_4 \cdot \text{Be}_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_2$  95  
 Биотит 145  
 Вирюза  $\text{CuAl}_6(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2[\text{PO}_4]_4$  18  
 Бокситы  $\text{AlOON}$  124, 125, 130–133, 151  
 Бор B 9, 12, 90, 103, 107, 123  
 Борнит  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  81  
 Бром Br 12, 17, 22  
  
 Ванадий V 11, 12, 14, 17, 48, 81, 82, 86, 91, 121, 130 145  
 Вермикулит 145  
  
 Висмут Bi 9–12, 63, 81, 84, 85, 96, 123  
 Висмутит  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  84  
 Витерит  $\text{BaCO}_3$  15  
 Вольфрам W 9, 10, 12, 24, 34, 37, 39, 57, 80–85, 94, 96, 115, 123  
 Вольфрамит  $(\text{Fe, Mn})\text{WO}_4$  10, 30, 83  
 Воробьевит  $\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$  86  
  
 Галенит (свинцовый блеск)  $\text{PbS}$  8, 15, 19, 54, 57, 63, 71, 77  
 Галит (соль каменная, поваренная)  $\text{NaCl}$  18, 19, 103, 104, 106, 107  
 Галлий Ga 13–15, 17, 61, 81, 82  
 Гафний Hf 13–14, 17, 81  
 Гематит (железный блеск, красный железняк)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  112, 113, 139  
 Германий Ge 13, 15, 60, 81, 82  
 Германит  $\text{Cu}_3(\text{Fe, Ge})\text{S}_4$  15  
 Гётит  $\text{FeOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  112  
 Глина 11, 18, 19, 95, 102, 109, 116, 124, 125, 127, 142, 144  
 Глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$  81, 90, 124–133  
 Горный хрусталь  $\text{SiO}_2$  10, 134, 135  
 Гранат 50, 95, 98  
 Графит C 25, 38, 51, 65, 66, 68, 82, 118  
  
 Давсонит  $\text{NaAl}(\text{OH})_2\text{CO}_3$  134  
 Диопсид  $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$  146  
 Доломит  $(\text{Ca, Mg})(\text{CO}_3)_2$  88, 102, 117  
  
 Европий Eu 82  
  
 Железо Fe 4, 8, 9, 12, 15, 17, 19–22, 24, 25, 57, 64, 69–71, 75, 80, 81, 84–86, 97, 102, 108–124, 126, 135, 136, 138, 140, 146



- Золото Au 4, 5, 7, 9–12, 15, 18–20, 22, 25–37, 39, 42, 46, 49, 54, 63, 65, 74, 77–79, 81, 84, 85, 98, 108, 110, 113, 129, 147
- Известняк  $\text{CaCO}_3$  11, 18, 20, 21, 87, 88, 99, 102, 117
- Изумруд  $\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18}) \cdot \text{H}_2\text{O}]$  11, 18, 29, 40, 48, 86–91, 139, 140, 151
- Ильменит  $\text{FeTiO}_3$  15, 96–98, 112, 113, 136
- Индий In 14, 17, 81
- Иттрий Y 82
- Йод I 12, 14, 17, 22
- Кадмий Cd 12, 15, 17, 78, 79, 81, 82
- Каинит  $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  103, 105
- Калий K 11–13, 65, 71, 103–108, 128, 133, 135, 148
- Кальций Ca 11, 12, 16, 17, 19, 71, 100, 102, 103, 105, 148
- Кальцит  $\text{CaCO}_3$  15, 85, 88
- Каолин 124, 133, 144, 149
- Каолинит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  134
- Карналлит  $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  14, 103
- Карнеол  $\text{SiO}_2$  142
- Касситерит  $\text{SnO}_2$  10, 17, 30, 95, 98, 113
- Кварц (кварцит)  $\text{SiO}_2$ , 11, 15, 20, 22, 32, 40, 42, 69, 71, 78, 85, 88, 93, 95, 99, 116, 117, 134–143
- Кизерит  $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})[\text{SO}_4]$  103
- Кимберлит 8, 9, 39, 41, 49
- Кислород O 9, 11–13, 19, 69, 123, 124, 133, 136, 148, 149
- Кобальт Co 12, 63, 108, 124
- Кобальтин  $\text{COAsS}$  63
- Колчедан 9, 17, 64
- Корунд  $\text{Al}_2\text{O}_3$  125, 126, 134, 151
- Кремний Si 11–13, 61, 117, 123, 132, 136–142, 144, 148, 151
- Кремнезем  $\text{SiO}_2$  9, 21, 24, 90, 117, 130, 134–143
- Криолит  $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$  15, 128, 133
- Кристобалит  $\text{SiO}_2$  135
- Лазурит 40
- Лантан La 80, 82
- Лейцит 15
- Лепидолит  $(\text{K}, \text{Li})\text{Al}(\text{Si}_3\text{AlO}_{10}) \cdot (\text{OH}, \text{F})_2$  145
- Лешательерит  $\text{SiO}_2$  135
- Лимонит  $\text{FeO} \cdot \text{OH}$  112, 113
- Литий Li 9, 10, 12, 17, 80–82, 90, 95, 103, 136, 145
- Магнетит (магнитный железняк)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$  5, 8, 10, 17, 19, 54, 55, 57, 81, 98, 112–116, 125, 136
- Магний Mg 11, 12, 14, 16, 17, 92, 98, 102, 103, 105–108, 127, 130, 146, 148
- Манганит  $\text{MnO} \cdot \text{OH}$  124
- Марганец Mn 12, 14, 15, 24, 48, 57, 65, 86, 113, 117, 121–124, 138
- Мартит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  112
- Медь Cu 4, 8–12, 14, 17–19, 21, 22, 26, 57, 63–65, 69–72, 74, 77–79, 84–86, 92, 96, 107, 108, 123, 124, 127, 129, 130, 138, 139
- Менегинит 81
- Мел  $\text{CaCO}_3$  11, 18, 20
- Молибден Mo 4, 10, 21, 61, 63, 80–86, 96
- Молибденит (молибденовый блеск)  $\text{MoS}_2$  10, 17, 68, 82–84
- Монацит  $\text{CePO}_4$  98
- Морюнит  $\text{SiO}_2$  137
- Мусковит 144
- Мышьяк As 8, 9, 11, 12, 14, 17, 21, 63, 123
- Натрий Na 11, 12, 85, 98, 103, 105–107, 131, 136, 148
- Нефелин  $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$  15, 81, 100, 133
- Нефрит 18
- Никель Ni 8, 10–12, 14, 17, 22, 63, 64, 71, 96, 108, 124
- Ниобий Nb 17, 80–82, 95, 98
- Оксиды (окислы) 7, 8, 11, 112, 121, 129
- Оливин 14
- Олово Sn 8–10, 12, 14, 15, 19, 37, 39, 57, 63, 80, 94, 96, 116, 123
- Оникс  $\text{SiO}_2$  140, 142
- Опал  $\text{SiO}_2$  134, 135, 137, 140, 141
- Ортоклаз  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$  105
- Пермагнит 17, 89, 90, 93–95
- Пентландит  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{Sg}$  17, 64
- Перовскит  $\text{CaTiO}_3$  112
- Пирит  $\text{FeS}_2$  8, 15, 17, 54, 57, 61,

- 64, 69, 71, 78–81, 84, 88, 112, 114  
 Пирролюзит  $\text{MnO}_2$  121–123  
 Пироп  $\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$  49  
 Пирротин (Fe, Ni) Sn 8, 17  
 Плагиоклаз 15  
 Платиноиды Os, Ir, Ru, Rh, Pd 11, 25  
 Платина Pt 8, 12, 17, 48, 54  
 Повеллит  $\text{CaMoO}_4$  85  
 Полигалит  $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_2 \cdot (\text{SO}_4)_4$  103, 107  
 Поташ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  105  
 Празем  $\text{SiO}_2$  139  
 Прустит  $\text{Ag}_2\text{S}$  64  
 Псиомелан  $\text{MnO}_2 \cdot \text{MnO} \cdot \text{BaO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  121  
 Радий Ra 12, 19  
 Рассеянные элементы 12–14 17, 60, 86  
 Раухтопаз  $\text{SiO}_2$  137  
 Редкие элементы (металлы) 14, 17, 24, 60, 80–82, 98, 116  
 Редкоземельные элементы (лап-танды) TR 16, 17, 81, 82, 98, 101  
 Рений Re 14, 81, 82, 86  
 Родонит (Орлец)  $\text{CaMn}_4\text{Si}_5\text{O}_{15}$  121  
 Родохрозит  $\text{MnCO}_3$  121  
 Ртуть Hg 7, 9, 10, 12, 14, 23, 63, 71, 81, 96, 128  
 Рубидий Rb 12, 14, 17, 81, 86  
 Рубин  $\text{Al}_2\text{O}_3$  40, 48, 91, 124–127  
 Рутил  $\text{TiO}_2$  11, 96–98, 136, 138, 139  
 Санфир  $\text{Al}_2\text{O}_3$  40, 50, 124–127, 138  
 Сардер  $\text{SiO}_2$  140, 142  
 Свинец Pb 4, 8–12, 14, 19, 21, 22, 36, 57, 63, 69, 71, 74, 76, 77–81, 96  
 Селен Se 12, 15, 17, 63, 80, 81, 86  
 Сера S 9, 11, 12, 17, 22, 25, 61–63, 65, 68–70, 78, 80, 108, 117, 118, 123  
 Сердолик  $\text{SiO}_2$  142, 143  
 Серебро Ag 8, 10, 12, 15, 17, 19, 25, 54, 63, 71, 74, 77, 79, 80, 85, 108, 110, 129  
 Сидерит  $\text{FeCO}_3$  112, 144  
 Силикаты 9, 134–143  
 Сильвин KCl 15, 103, 105  
 Скандий Sc 14, 17, 82  
 Сланцы горючие 51 62  
 Слюда 15, 87, 89, 90, 93, 95, 116, 124, 139, 144–146  
 Сподумен  $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$  17  
 Станнин  $\text{Cu}_2\text{FeSn}_4$  64  
 Стронций Sr 12, 81, 82  
 Сульфиды 4, 7, 10, 11, 13, 17, 22, 63–80, 84, 86  
 Сфалерит (цинковая обманка)  $\text{ZnS}$  8, 15, 63, 64, 66, 70, 77–79, 81  
 Сфен  $\text{CaTiO}_2 \cdot \text{SiO}_4$  17, 101  
 Тажеранит  $\text{ZrO}_2 \cdot \text{HfO}_2$  50  
 Таллий Tl 13, 81  
 Тальк  $\text{Mg}_3(\text{OH})_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2$  68, 95  
 Тантал Ta 9, 12, 15, 17, 80–82, 95, 98  
 Теллур Te 12, 63, 80, 86  
 Титан Ti 9, 11, 34, 80, 82, 96–98, 112, 113, 126, 130, 136, 138  
 Титаномагнетит  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  9, 101, 112, 113, 116  
 Топаз  $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{F}_2$  50 89, 137  
 Торий Th 12, 17, 81  
 Тридимит  $\text{SiO}_2$  135  
 Турмалин 90, 95, 98  
 Углерод C 12, 25, 38, 39, 61, 108, 109, 114, 117, 123, 134, 135  
 Уголь C 3–5, 11, 19, 21, 22, 25, 38, 50–62, 64, 65, 68, 74, 77, 109, 111, 128, 133, 134  
 Уран U 9, 10, 12, 14, 46, 80, 81  
 Фенакит  $\text{Be}[\text{Be}(\text{SiO}_4)]$  95  
 Фиацит  $\text{ZrO}_2 \cdot \text{HfO}_2$  50  
 Флогопит 145  
 Флюорит (плавиковый шпат)  $\text{CaF}_2$  10, 17, 57  
 Фосфор P 9, 12, 21, 24, 81, 99–103, 108, 117, 118, 132  
 Фосфорит  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  99, 101, 102  
 Франклинит 113  
 Фтор F 7, 9, 10, 12, 22, 89, 94  
 Халцедон  $\text{SiO}_2$  137, 139–142  
 Халькозин  $\text{Cu}_2\text{S}$  8, 63  
 Халькопирит  $\text{CuFeS}_2$  8, 15, 17, 63, 64, 70, 79, 81, 84  
 Хлор Cl 7, 12, 22, 98, 103–107, 128  
 Хлорит 98  
 Хризоберилл  $\text{Al}_2\text{BeO}_4$  86, 95, 139  
 Хризопраз  $\text{SiO}_2$  140  
 Хризолит  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 [\text{SiO}_4]$  40

Хром Cr 8, 9, 12, 14, 17, 22, 48,  
71, 77, 86, 88, 89, 91, 123, 126,  
132, 138, 145  
Хромит  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  17

Цезий Cs 81

Цеолиты 148–150

Церий Ce 80, 86

Цинк Zn 4, 8–12, 14, 17, 22, 57,  
63, 66, 69–71, 74, 76–79, 81, 96,  
107

Циннвальдит  $\text{KLiFeAl}(\text{F}, \text{OH})_2 \cdot$   
 $\cdot (\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$  90, 145

Циркон  $\text{ZrSiO}_4$  11, 98, 136

Цирконий Zr 9, 12–14, 34, 80,  
81

Цитрин  $\text{SiO}_2$  137–139

Шеелит  $\text{CaWO}_4$  83, 85

Шпат полевой (K, Na)  $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$   
15, 16, 21, 93, 95, 101, 124, 134,  
136, 144

Эгирин  $\text{NaFe}[\text{Si}_2\text{O}_5]$  101

Яшма  $\text{SiO}_2$  134, 137, 143

## Рекомендуемая литература

- Барский Л. А.* Как ископаемые становятся полезными. М.: Недра, 1964.
- Барский Л. А.* Основы минералургии. М.: Наука, 1984.
- Годовиков А. А.* Минералогия. М.: Недра, 1983.
- Горная энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1984—1990. Т. 1—5.
- Смит Г.* Драгоценные камни. М.: Мир, 1984.
- Ферсман А. Е.* Запимательная минералогия. Л.: Время, 1933.
- Ферсман А. Е.* Воспоминания о камне. М.: Наука, 1969.
- Шуман В.* Мир камня. М.: Мир, 1986. Т. 1, 2.

## Содержание

<b>Введение . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>Рождение минералов . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>Ошибка инженера Гарина . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>Родные и знакомые . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>Люди и камни . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>Каменный век и 100000 лет спустя . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>Металлургия и минералургия . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>Люди гибнут за металл . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>Самородки . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>Золото инков . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>Эльдорадо . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>Злая шутка Джона Месснера . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>Золотое руно . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>Золото Сибири и Колымы . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>Цена чистоты, постоянства и твердости . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>Три ипостаси углерода . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>Твердость и постоянство . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>Блеск и нищета алмазной империи . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>Алмазный фонд СССР . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>Горячий камень . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>Деревянный минерал . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>На-гора . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>Урожай гравитационного поля . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>Судьба золушки . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>Сульфиды — ненавидящие воду . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>Блеск с обманкой . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>От любви до ненависти — один шаг . . . . .</b>	<b>64</b>
<b>Подметаллы Рудного Алтая . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>Минералы XX века . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>Редки ли «редкие элементы»? . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>Шахта вверх, за облака . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>Изумруд и его бедный родственник . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>Красный минерал белого металла . . . . .</b>	<b>96</b>

Камни плодородия . . . . .	99
«Элемент жизни и мысли» . . . . .	99
Удобрения из древнего океана . . . . .	103
Рабочая косточка века . . . . .	108
Заря железного века . . . . .	108
Минералургия железа . . . . .	111
Черная металлургия . . . . .	117
Русское железо . . . . .	119
Черный осветлитель . . . . .	121
Металлическая основа Земли . . . . .	124
Рубины и сапфиры . . . . .	124
Крылатый металл . . . . .	127
Бокситы на исходе . . . . .	130
Построено на песке . . . . .	134
Мир кремния . . . . .	134
Обыкновенный песок . . . . .	135
Богатые родственники песка . . . . .	136
Странные камни . . . . .	144
Минерал в окне . . . . .	144
Горная кудель . . . . .	146
Сито для молекул . . . . .	148
Заключение . . . . .	151
Указатель минералов, руд и химических элементов . . . . .	153
Рекомендуемая литература . . . . .	157

Научно-популярное издание

**БАРСКИЙ**

**Лев Абрамович**

**«ПРИНЦЫ» И «НИЩИЕ»**

**В ЦАРСТВЕ МИНЕРАЛОВ**

Утверждено к печати

Редколлегией серии

«Научно-популярная литература»

Редактор

**Н. Л. Казюкова**

Художник

**А. М. Драговой**

Художественный редактор

**В. С. Филатович**

Технический редактор

**В. В. Тарасова**

Корректоры

**Л. А. Стойкина, Л. В. Щеголев**

ИБ № 37505

Сдано в набор 05.10.87

Подписано к печати 21.01.88

Т-01819. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>

Бумага книжно-журнальная

Гарнитура обыкновенная

Печать высокая

Усл. печ. л. 8,82. Усл. кр. отт. 9,87

Уч.-изд. л. 9,4

Тираж 25 000 экз. Тип. зак. 931

Цена 45 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени

издательство «Наука»

117864, ГСП-7, Москва, В-485,

Профсоюзная ул., 90

2-я типография издательства «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6

Сканирование - Беспалов, Николаева  
DjVu-кодирование - Беспалов





## Человек и окружающая среда

Разнообразны и удивительны судьбы минералов — и тех, которые известны как ювелирные ценности, и тех, добыча и переработка которых осуществляется для получения металлов, минеральных удобрений, топлива, строительных материалов... О происхождении, открытии, промышленном освоении, методах извлечения из руд и роли в истории человечества наиболее важных минералов рассказывает эта книга.



Л. А. Барский

**„Принцы” и „нищие”  
в царстве  
МИНЕРАЛОВ**

