

# ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ПУТЕВОДИТЕЛЬ ПО ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЕ

118 ОТКРЫТИЙ,  
КОТОРЫЕ ИЗМЕНИЛИ МИР



# ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ПУТЕВОДИТЕЛЬ  
ПО ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЕ

Илья Леенсон

Издательство АСТ  
Москва

# Содержание

ВВЕДЕНИЕ

Что такое химический элемент

ВОДОРОД

МЕТАЛЛЫ

ЩЕЛОЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Литий

Натрий

Калий

Рубидий и цезий

Франций

ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Бериллий

Магний

Кальций

Стронций

Барий

Радий

ГРУППА СКАНДИЯ

Скандий

Иттрий

ЛАНТАН И ЛАНТАНОИДЫ

Лантан

Церий

6 Празеодим и неодим

6 Прометий

20 Самарий

20 Европий

22 Гадолиний

24 Тербий

24 Диспрозий

25 Гольмий

26 Эрбий

28 Тулий

29 Иттербий

Лютеций

30

30 АКТИНИЙ И АКТИНОИДЫ

31 Актиний и протактиний

32 Торий

34 Уран

35

36 ГРУППА ТИТАНА

Титан

38 Цирконий

40 Гафний

41

ГРУППА ВАНАДИЯ

42 Ванадий

44 Ниобий и тантал

44

46

46

47

48

49

49

50

50

51

51

52

53

54

56

57

58

60

60

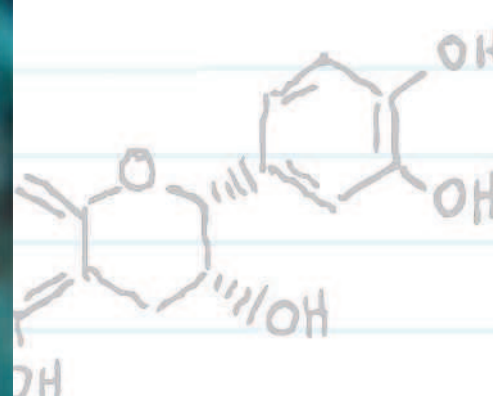
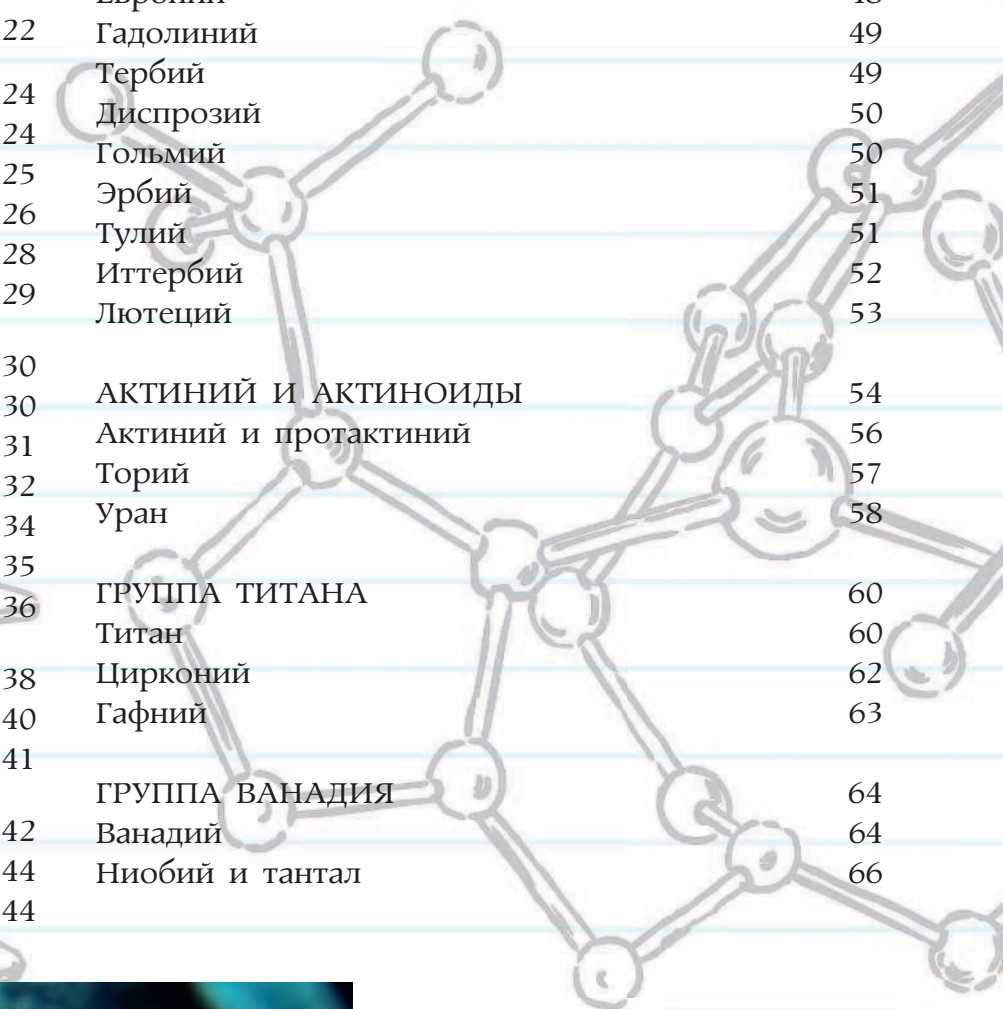
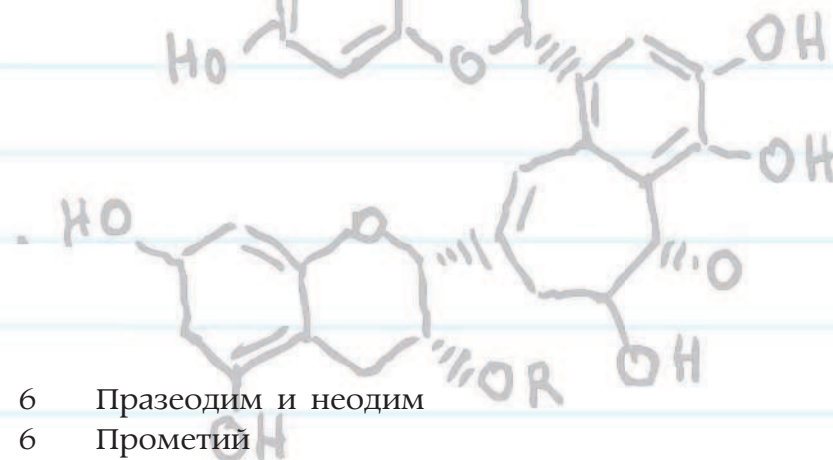
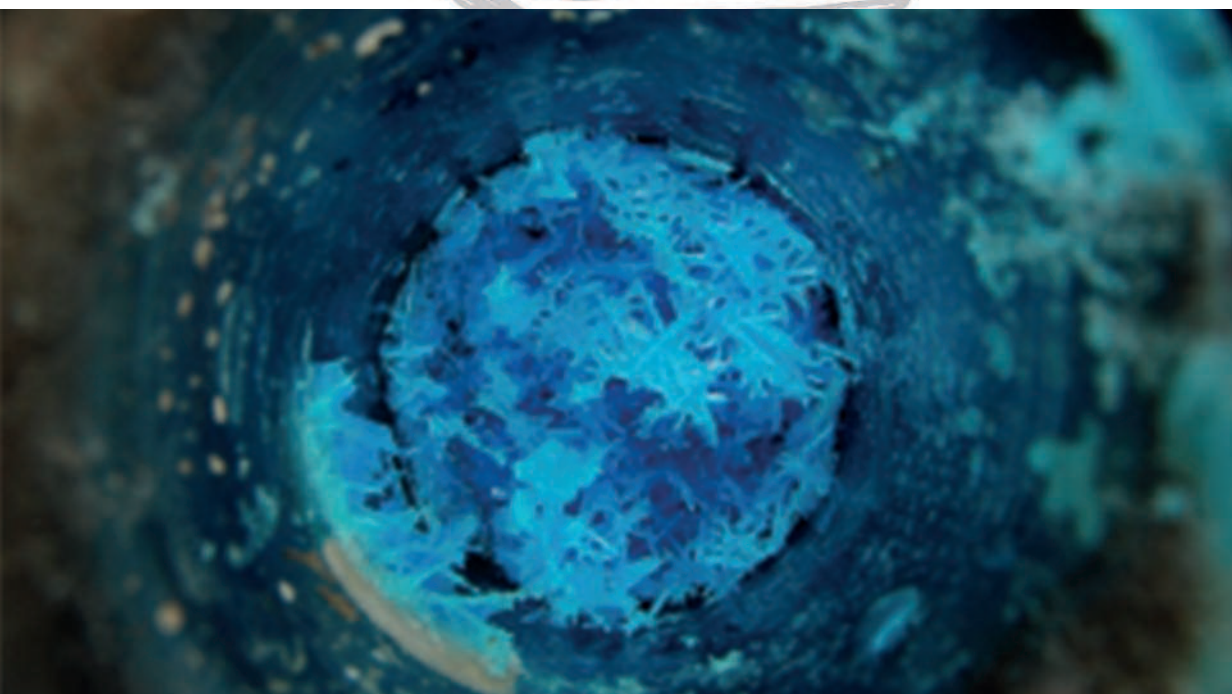
62

63

64

64

66



|          |          |           |      |
|----------|----------|-----------|------|
| Vanadium | Chromium | Manganese | Iron |
| 23       | 24       | 25        | 26   |

|              |    |
|--------------|----|
| ГРУППА ХРОМА | 68 |
| Хром         | 68 |
| Молибден     | 70 |
| Вольфрам     | 71 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| ГРУППА МАРГАНЦА | 72 |
| Марганец        | 72 |
| Технеций        | 74 |
| Рений           | 76 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| ТРИАДА ЖЕЛЕЗО–КОБАЛЬТ–НИКЕЛЬ | 78 |
| Железо                       | 78 |
| Кобальт                      | 81 |
| Никель                       | 82 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| ТРИАДА РУТЕНИЙ–РОДИЙ–ПАЛЛАДИЙ | 84 |
| Рутений                       | 84 |
| Родий                         | 86 |
| Палладий                      | 87 |

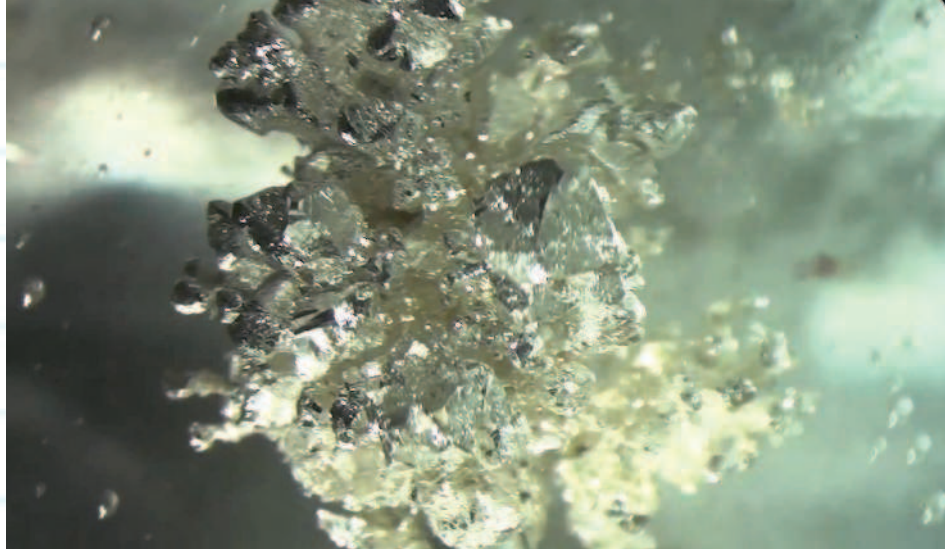
|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| ТРИАДА ОСМИЙ – ИРИДИЙ – ПЛАТИНА | 88 |
| Осмий                           | 88 |
| Иридий                          | 90 |
| Платина                         | 91 |

|             |    |
|-------------|----|
| ГРУППА МЕДИ | 94 |
| Медь        | 94 |
| Серебро     | 96 |
| Золото      | 98 |

|              |     |
|--------------|-----|
| ГРУППА ЦИНКА | 100 |
| Цинк         | 100 |
| Кадмий       | 102 |
| Ртуть        | 103 |

|             |     |
|-------------|-----|
| ГРУППА БОРА | 106 |
| Бор         | 106 |
| Алюминий    | 107 |
| Галлий      | 109 |
| Индий       | 109 |
| Таллий      | 111 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| ГРУППА УГЛЕРОДА | 112 |
| Углерод         | 112 |
| Кремний         | 114 |



|          |     |
|----------|-----|
| Германий | 116 |
| Олово    | 116 |
| Свинец   | 118 |

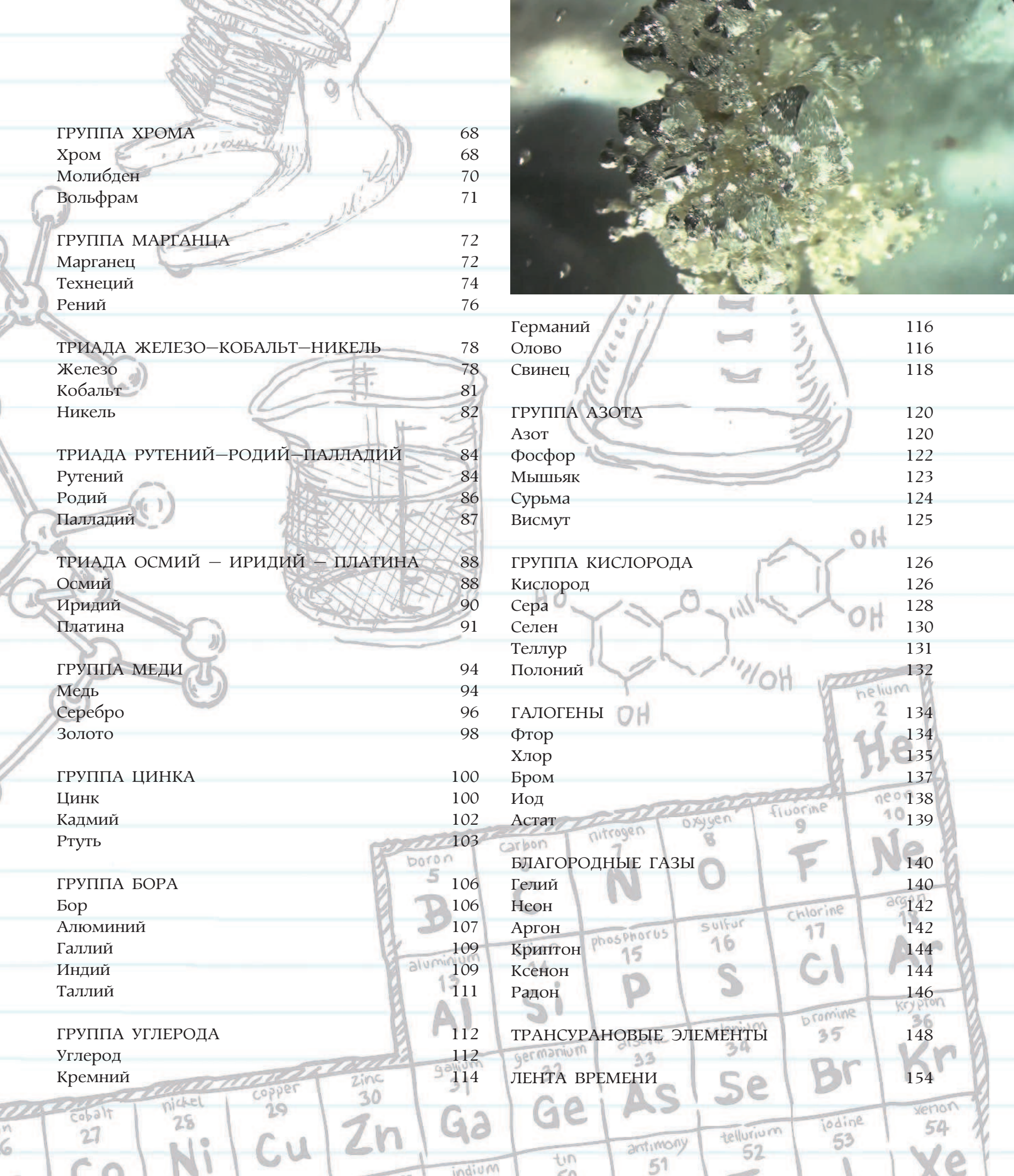
|              |     |
|--------------|-----|
| ГРУППА АЗОТА | 120 |
| Азот         | 120 |
| Фосфор       | 122 |
| Мышьяк       | 123 |
| Сурьма       | 124 |
| Висмут       | 125 |

|                  |     |
|------------------|-----|
| ГРУППА КИСЛОРОДА | 126 |
| Кислород         | 126 |
| Сера             | 128 |
| Селен            | 130 |
| Теллур           | 131 |
| Полоний          | 132 |

|          |     |
|----------|-----|
| ГАЛОГЕНЫ | 134 |
| Фтор     | 134 |
| Хлор     | 135 |
| Бром     | 137 |
| Иод      | 138 |
| Астат    | 139 |

|                  |     |
|------------------|-----|
| БЛАГОРОДНЫЕ ГАЗЫ | 140 |
| Гелий            | 140 |
| Неон             | 142 |
| Аргон            | 142 |
| Криптон          | 144 |
| Ксенон           | 144 |
| Радон            | 146 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ | 148 |
| ЛЕНТА ВРЕМЕНИ          | 154 |



# ВВЕДЕНИЕ

## Что такое химический элемент

НА СТРАНИЦАХ ЭТОЙ КНИГИ ВЫ УЗНАЕТЕ ОБО ВСЕХ ОТКРЫТЫХ К НАСТОЯЩЕМУ ВРЕМЕНИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ. Из этих элементов образовано все, что нас окружает. И, конечно, сам человек.



*И кристаллы медного купороса,  
и сосновый лес — всё состоит  
из химических элементов.*

*Другого ничего в природе нет  
ни здесь, ни там, в космических глубинах:  
всё — от песчинок малых до планет —  
из элементов состоит единых...*

*Кипит железо, серебро, сурьма  
и темно-бурые растворы брома,  
и кажется вселенная сама  
одной лабораторией огромной...*

*Будь то вода, что поле оросила,  
будь то железо, медь или гранит —  
всё страшную космическую силу,  
закованную в атомы, хранит.*

Эти строчки из стихотворения Степана Щипачёва «Читая Менделеева» как нельзя лучше подходят к этой книге в качестве эпиграфа. Они написаны в 1948 г., но поэт как будто предвидел, что наука подтвердит его догадку: химические элементы созданы в «огромной лаборатории Вселенной» под действием «страшной космической силы». А что говорит на этот счёт современная наука? Как появились химические элементы и что это за «страшная сила», которая их создала?

Но сначала о том, что же такое химический элемент. Это понятие сформировалось в XVIII веке, когда химия делала свои первые шаги. Но почти за две с половиной тысячи лет до этого пылливый ум древнегреческих философов уже сформулировал атомистическую гипотезу. Впервые понятие атома появилось у философа Левкиппа (ок. 500—440 до н.э.), а развил эту теорию его ученик Демокрит (ок. 460—371 до н.э.). Они считали, что в мире все состоит из неких мельчайших, не видимых глазом частиц, которые могут соединяться и разъединяться, порождая все видимые вещи.



Суть атомистической теории очень образно описал древнеримский поэт и философ Тит Лукреций Кар (ок. 99—55 до н. э.). Вот небольшие выдержки из его поэмы «О природе вещей». Следует учесть, что вместо «атомы» или «элементы» Лукреций использует понятия «начала», «первоначала», «семена» и т.п.

*...Существуют такие тела, что и плотны, и вечны:  
Это — вещей семена и начала в учении нашем,  
То, из чего получился весь мир, существующий ныне...  
Первоначалам должно быть присуще бессмертное тело,  
Чтобы все вещи могли при кончине на них разлагаться.  
И не иссяк бы запас вещества для вещей возрождения.  
Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны.  
Иначе ведь не могли бы они, сохраняясь веками,  
От бесконечных времён и досель восстанавливать вещи...*

Лукреций пытается подтвердить атомистическую теорию житейским опытом:

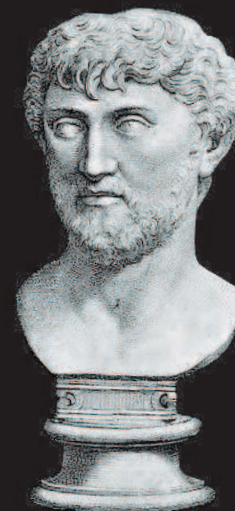
*...Начала вещей недоступны для глаза...  
Существуют тела, которых мы видеть не можем  
Запахи мы обоняем различного рода,  
Хоть и не видим совсем, как в ноздри они проникают.  
И, наконец, на морском берегу, разбивающем волны,  
Платье сырее всегда, а на солнце вися, оно сохнет;  
Видеть, однако, нельзя, как влага на нём оседает,  
Да и не видно того, как она исчезает от зноя.  
Значит, дробится вода на такие мельчайшие части,  
Что недоступны они совершенно для нашего глаза.*

Лукреций объясняет, почему из небольшого числа разных атомов может образоваться бесконечное разнообразие материальных тел:

*Часто имеет ещё большое значение, с какими  
И в положеньи каком войдут в сочетание те же  
Первоначала и как они двигаться будут взаимно.  
Те же начала собой образуют ведь небо и землю,  
Солнце, потоки, моря, деревья, плоды и животных...  
Даже и в наших стихах постоянно, как можешь заметить,  
Множество слов состоит из множества букв однородных,  
Но и стихи, и слова, как ты непременно признаешь,  
Разнятся между собой и по смыслу и также по звуку.  
Видишь, как буквы сильны лишь одним измененьем порядка...*

Действительно, используя всего два-три десятка букв, можно создать всю мировую художественную и научную литературу; из 12 нот хроматической гаммы — бесконечное разнообразие музыкальных произведений; из трех основных цветов — миллионы цветовых оттенков. Точно так же из немногих первоначал-элементов создаётся весь окружающий нас мир.

Атомистическая теория античных философов была забыта почти на два тысячелетия. Ее возродил, уже на строгой научной основе, английский химик Джон Дальтон (1766—1844). Каждому известному элементу у Дальтона соответствовал свой сорт атомов — со своей массой и своими свойствами. Эксперименты Дальтона впервые позволили, пусть и неточно, определить относительные атомные массы ряда химических элементов. То есть во сколько раз, например, масса атома кис-



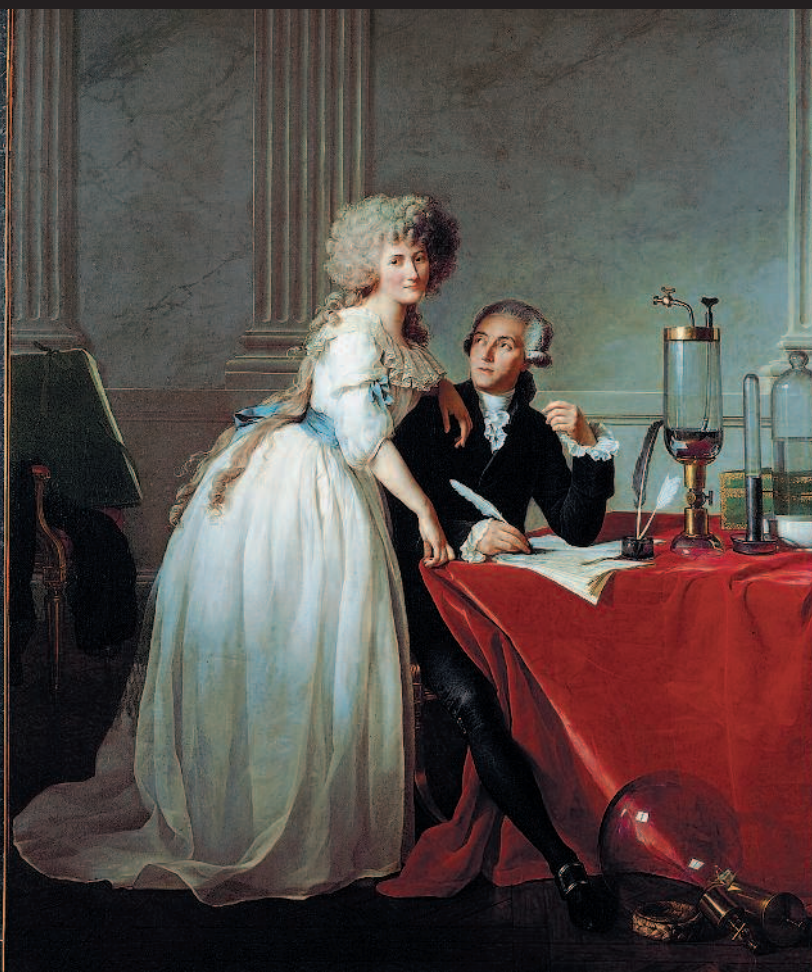
Тит Лукреций Кар — римский поэт и философ-материалист, I в. до н.э.



Джон Дальтон — английский химик.

| ELEMENTS     |    |              |  |
|--------------|----|--------------|--|
| Hydrogen 1   | 1  | Strontian 86 |  |
| Acid 2       | 2  | Barytes 86   |  |
| Carbon 4     | 4  | Iron 56      |  |
| Oxygen 7     | 7  | Zinc 66      |  |
| Phosphorus 9 | 9  | Copper 56    |  |
| Sulphur 16   | 16 | Lead 207     |  |
| Magnesia 24  | 24 | Silver 197   |  |
| Lime 28      | 28 | Gold 197     |  |
| Soda 23      | 23 | Platina 197  |  |
| Potash 40    | 40 | Mercury 167  |  |

Таблица химических элементов Дальтона.



Ж.-Л. Давид. Антуан Лавуазье с женой.  
1788 г.



А. Вольта — итальянский физик.

лорода больше массы атома водорода. Различные элементы в своих статьях Дальтон изображал как старинными алхимическими символами, так и изобретенными им значками. Дальтон известен также тем, что описал дефект зрения, которым страдал, — цветовую слепоту, которая названа дальтонизмом.

Окончательно понятие химического элемента сформировалось во второй половине XVIII века, в частности, в работах великого французского химика Антуана Лорана Лавуазье (1743–1794). Он писал: «Все вещества, которые мы еще не смогли никаким способом разложить, являются для нас элементами». В настоящее время химическим элементом называется совокупность атомов одного сорта. Химический элемент нельзя увидеть, это некая абстракция. Зато увидеть, а часто и потрогать, можно простое вещество. Например, из множества атомов химического элемента углерода можно получить кристалл алмаза. А можно — кристалл похожего на алмаз и даже более твердого лонсдейлита. Можно из атомов углерода получать и другие простые вещества: графит, множество разных фуллеренов, нанотрубки и т. д. Углерод — не исключение, а правило: из атомов почти всех химических элементов можно получить разные простые вещества. Они отличаются либо числом атомов в молекуле (это более редкий случай; примером могут служить кислород и озон), либо расположением атомов относительно друг друга в кристалле (как в графите и алмазе).

Если вещество построено из атомов разных элементов, то такое вещество называется сложным. Когда-то вода считалась простым веществом. Лавуазье впервые сумел разложить воду: он пропустил ее пары через раскаленный ружейный ствол, и атомы железа оторвали атомы кислорода от молекул воды, превратившись в окалину. Остался газообразный водород, который Лавуазье смог собрать. При соединении водорода с кислородом снова получалась вода. Когда итальянский физик Алессандро Вольта (1745–1827) изобрел удобный источник электрического тока, с его помощью удалось разложить воду и получить сразу и водород, и кислород.

Так было доказано, что вода — сложное вещество. А вот газ хлор когда-то химики считали сложным веществом. Однако не удались все попытки разложить этот газ. Пришлось признать, что хлор — простое вещество.

Вот еще один наглядный пример. Когда реагируют железо и сера, два простых вещества, образуется сложное вещество — сульфид железа, который по физическим и химическим свойствам совершенно не похож ни на железо, ни на серу (так же, как вода не похожа на водород и кислород). Мы можем сказать, что сульфид железа состоит из элемента железа и элемента серы. Но никогда химик не скажет, что сульфид железа содержит простые вещества — железо и серу. Иначе получилось бы, что это вещество представляет собой смесь, то есть часть его притягивалась бы магнитом, а другая часть имела жёлтый цвет и легко плавилась. Представить себе такое вещество затруднительно. На эту тему можно привести строки Евгения Винокурова:

*И в учебник по химии взор мой тупо вперен:  
до сих пор я не понял задачу, где смешаны сера с азотом.*

Действительно, трудно понять, как можно смешать эти два вещества. В русском языке (как, впрочем, в большинстве иностранных) для обозначения как элементов, так и простых веществ используются одни и те же термины. Например, если говорят «медная монета», «медь хорошо проводит электрический ток», очевидно, что речь идет о простом веществе, металле. Если же сказать, что медь распространена в природе меньше, чем алюминий, то здесь имеют в виду химические элементы медь и алюминий. Утверждая, что «медь занимает в таблице Менделеева место между никелем

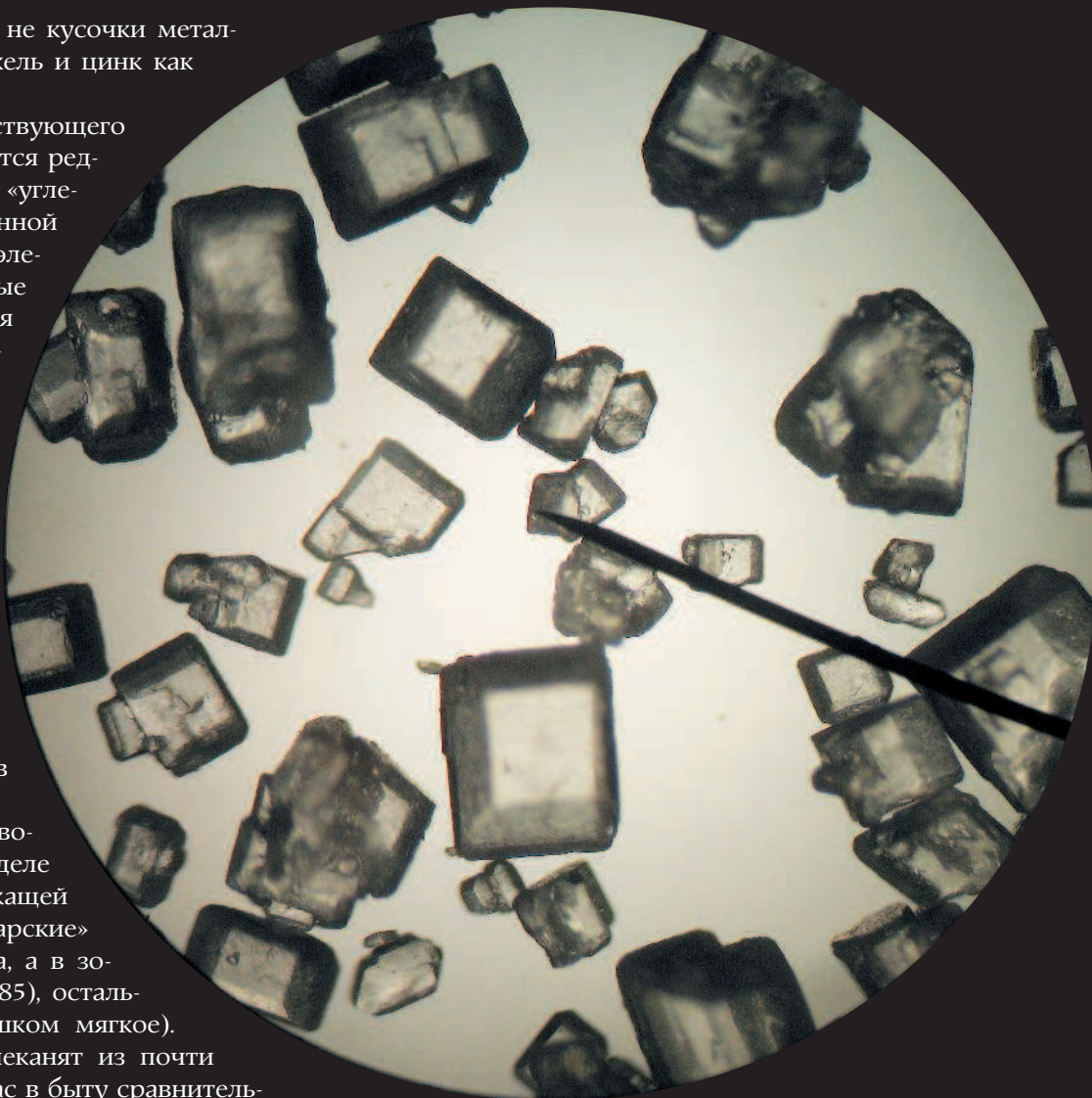
и цинком», химик также имеет в виду вовсе не кусочки металлов в клетках таблицы, а элементы медь, никель и цинк как совокупность их атомов.

Разные термины для элемента и соответствующего простого вещества в русском языке встречаются редко. Таким примером могут служить термины «углерод» и «графит». Интересно, что в современной украинской химической номенклатуре для элементов и простых веществ используют разные слова. Вот несколько примеров (приводятся символ элемента и украинские названия простого вещества и химического элемента): Н — водень, Гідроген; О — кисень, Оксиген; Si — кремній, Силіцій; S — сірка, Сульфур; F — фтор, Флуор; Cu — мідь, Купрум; Ag — срібло, Аргентум; Au — золото, Аурум; Hg — ртуть, Меркурій; Fe — залізо, Ферум; Bi — вісмут, Бісмут. То есть в основе названия химического элемента — соответствующее латинское название, которое пишется с прописной буквы. Остается только пояснить, что удвоенные согласные в украинском языке очень редки, а буква г (с «хвостиком») используется для написания иностранных слов и показывает, что этот звук твердый.

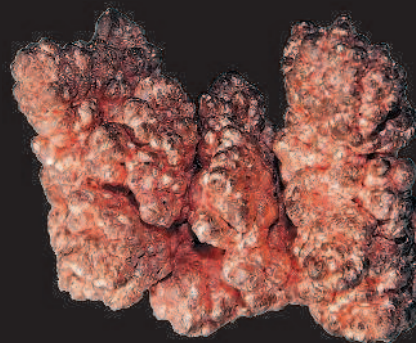
В заключение отметим, что, хотя мы говорим «железный гвоздь», гвозди на самом деле делают из низкоуглеродистой стали, содержащей небольшое количество углерода. Золотые «царские» десятки содержат только 90% чистого золота, а в золотом кольце его часто всего 58,5% (проба 585), остальное — серебро и медь (чистое золото слишком мягкое). И только коллекционные золотые монеты чеканят из почти чистого (99,9%) золота. Число окружающих нас в быту сравнительно чистых простых веществ невелико. Это алюминий и медь в электрических проводах; металлы вольфрам и молибден в лампах накаливания (из молибдена сделаны впаянные в стекло проволочки, поддерживающие вольфрамовую спираль), а колба лампы может быть наполнена аргоном, криптоном или ксеноном; гелий в воздушных шариках; серебро, золото, платина, палладий в высокопробных ювелирных изделиях и памятных монетах; ртуть в термометре (маленькие капельки ртути содержатся также в энергосберегающих лампах и лампах дневного света, а в горящих лампах ртуть находится в виде паров); олово на консервной банке и олово для пайки (чаще паяют третником — сплавом олова и свинца); хром и никель на хромированных и никелированных металлических изделиях; цинк в электрических батарейках и на поверхности оцинкованного ведра (на новом ведре видны красивые цинковые кристаллы); порошок серы для борьбы с вредителями растений. К этому можно с некоторой натяжкой добавить иод (всё же мы видим его не в чистом виде, а в растворе), кремний и германий в полупроводниковых приборах (а их мы вообще не видим)...

### КАК УСТРОЕНЫ АТОМЫ И ОТКУДА ОНИ ВЗЯЛИСЬ

Атомы состоят из очень плотного и очень маленького ядра, около которого движутся электроны: от одного в атоме водорода до 116 электронов в атоме ливермория, последнего элемента, имеющего название. Атом напоминает Солнечную систему:



Кристаллы сахара под микроскопом.



Самородок меди.



Э. Резерфорд — английский физик.

Планеты в Солнечной системе двигаются по круговым орбитам вокруг Солнца, чего нельзя сказать о движении электронов вокруг ядра.



планеты в ней движутся вокруг центрального массивного тела — Солнца, а электроны в атоме — вокруг ядра. Причем в обоих случаях вещество занимает ничтожную часть пространства. Так, в Солнечной системе почти вся масса (99,87%) сосредоточена в самом Солнце. И в атомах почти вся масса сосредоточена в ядре (в атоме водорода — 99,95%). Но атом намного более «пустой», чем Солнечная система! Расстояние от Солнца до самой далекой планеты примерно в 6500 раз больше радиуса самого Солнца. Размеры же атомов примерно в 100 тысяч раз превышают размеры ядра! Если «увеличить» ядро атома до размера булавочной головки, то сам атом увеличится до размера футбольного поля! Это означает, что атомы «внутри» почти пустые. Если представить себе огромный свинцовый куб с ребром размером 100 м, то фактически вся его масса (11 млн тонн) будет сосредоточена в ядрах свинца, суммарный объем которых меньше спичечной головки! Трудно даже представить себе невероятно высокую плотность ядерного вещества в любых атомах. Масса электрона в 1836 раз меньше массы ядра атома водорода. Ядра атомов заряжены положительно, а электроны отрицательно, и между ними действуют огромные силы притяжения.

Сравнение атома с Солнечной системой очень приблизительное. Электроны не вращаются, подобно планетам, вокруг центрального ядра по круговым или эллиптическим орбитам, а также не вращаются вокруг своей оси. Их движение описывается законами квантовой механики, для которых в повседневной жизни невозможно найти аналогии. Например, электрон может поглотить квант света — фотон — и при этом мгновенно исчезнуть в одной области пространства и появиться в другой области, более далекой от ядра. После этого электрон может также мгновенно, минуя все промежуточные области пространства, опять оказаться ближе к ядру и при этом испустить другой квант света. Эти переходы так и называются — квантовыми. Именно квантовая механика объясняет строение атомов разных элементов и их расположение в Периодической системе Д. И. Менделеева.

Ядро атома водорода представляет собой положительно заряженную элементарную частицу — протон; это слово придумал английский физик Эрнест Резерфорд (1871–1937), образовав его от *греч.* *protos* — первый. В ядрах всех остальных атомов содержатся не имеющие заряда элементарные частицы — нейтроны — от 1 до 176 для известных ядер. Слово «нейтрон» также придумал Резерфорд, образовав его от *лат.* *neuter* — ни тот, ни другой. Нейтроны помогают положительно заряженным протонам удерживаться в ядре, несмотря на огромные силы отталкивания между очень близко расположенными зарядами.

Каждый химический элемент имеет определенное число протонов в ядре от одного для самого легкого до 118 для самого тяжелого из известных на середину 2013 г.

В электрически нейтральном атоме число электронов равно числу протонов; именно электроны определяют основные химические свойства элемента. Число протонов в ядре элемента определяет заряд ядра  $Z$  и порядковый номер элемента в Периодической таблице. Этот фундаментальный закон открыл в 1913 г. талантливый английский физик Генри Мозли (1887–1915), погибший в возрасте 27 лет в ходе бездарной операции английских войск в Галлиполи.

Число нейтронов в ядре данного элемента может быть разным. Протоны и нейтроны имеют общее название — нуклоны, а тип атомов с данным числом протонов и нейтронов в ядре называется нуклидом (*от лат.* *nucleus* — ядро и *греч.* *eidos* — вид, сорт). Нуклиды данного элемента с разным числом нейтронов в ядре называются изотопами, от *греч.* *isos* — равный, одинаковый, подобный

и *topos* — место. Суммарное число протонов и нейтронов в ядре данного нуклида называется массовым числом; очевидно, что оно может быть только целым. Число протонов иногда указывают внизу перед символом элемента. Например,  ${}^3\text{Li}$ , но это делают редко, потому что сам символ лития подразумевает, что в ядре его атома три протона ( $Z = 3$ , и в таблице Менделеева литий находится под третьим номером). А вот массовое число очень важно для характеристики разных изотопов данного элемента. Его указывают вверху перед символом элемента; например,  ${}^7\text{Li}$  означает, что в ядре этого изотопа лития помимо трех обязательных протонов содержится также четыре нейтрона. Иногда массовое число указывают после названия элемента, отделяя его дефисом: литий-7, уран-238. Химические свойства разных изотопов данного элемента могут быть почти одинаковыми (например  ${}^{63}\text{Cu}$  и  ${}^{65}\text{Cu}$ ), но физические свойства иногда отличаются очень сильно. Например, нуклиды  ${}^{63}\text{Cu}$  и  ${}^{65}\text{Cu}$  стабильны, тогда как нуклид  ${}^{64}\text{Cu}$  радиоактивен и очень быстро распадается, поэтому этот нуклид в природе не встречается.

Во внешней оболочке Земли (земной коре) встречается примерно 90 химических элементов. Но распределены они крайне неравномерно. Еще в 1914 г. итальянский химик Джузеппе Оддо (1865–1954), а в 1917 г. американский химик Уильям Харкинс (1873–1951) на основе многих анализов показали, что элементы с четными порядковыми номерами значительно более распространены в природе — их почти 90%. Четные номера имеют самые распространенные в земной коре элементы — кислород ( $Z = 8$ ) и кремний ( $Z = 14$ ). Они дают почти 75% от массы земной коры. Других элементов мало (ванадий, медь), очень мало (рений, висмут) или даже практически нет (актиний, америций).

В 1889 г. американский геохимик Франк Уиглсуорт Кларк (1847–1931) впервые попытался оценить содержание известных тогда химических элементов в земной коре. С этой целью он собрал все имеющиеся тогда сведения по составу горных пород и вывел их средний состав. Впоследствии числа, выражающие среднее содержание того или иного элемента в земной коре, по предложению геохимика и минералога академика Александра Евгеньевича Ферсмана (1883–1945) стали называть кларками. Эти числа рассчитывают по результатам многочисленных анализов различных минералов и горных пород. Поэтому неудивительно, что кларки в разных справочниках могут различаться: они много раз уточнялись, и работа эта до сих пор не закончена. Так, в начале XX века кларк германия оценивался как  $10^{-10}$  %, но впоследствии было показано, что этого элемента в действительности в миллион раз больше! С серой же было наоборот: к началу 1930-х гг. считали, что ее 0,1%, а современное значение почти вдвое меньше.

Один из создателей геохимии Владимир Иванович Вернадский (1863–1945), выступая в 1909 г. на XII съезде русских естествоиспытателей и врачей, сказал: «В каждой капле и пылинке вещества на земной поверхности по мере увеличения тонкости наших исследований мы открываем все новые и новые элементы...»

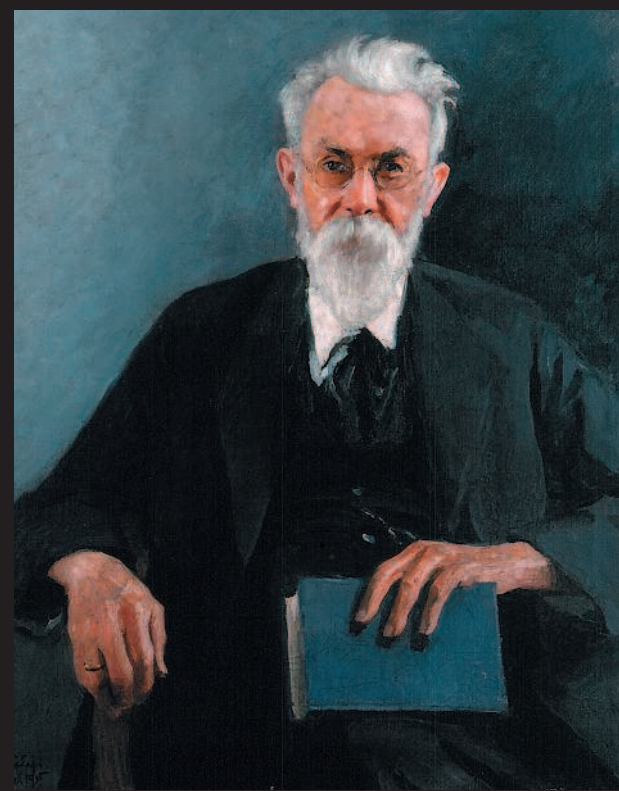
В песчинке или капле, как в микрокосмосе, отражается общий состав космоса. В ней могут быть найдены все те же элементы, какие наблюдаются на земном шаре, в небесных пространствах. Вопрос связан лишь с улучшением и уточнением методов исследования».

Значит, все элементы есть везде. И только недостаточная чувствительность современных методов анализа не позволяет определить их содержание. Кларк кислорода самый высокий — 46,1; кремния — 28,2, водорода — 0,14. А кларк редчайшего элемента рения составляет миллиардные доли процента. То есть в 1 г вещества в среднем содержится примерно  $10^{-9}$  г (1 нанограм) рения. Но даже в этом ничтожном количестве содержатся триллионы атомов рения!

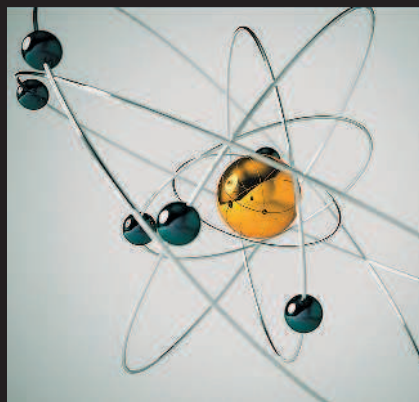
Кларк радия почти в тысячу раз меньше, чем рения, но все равно в 1 г какого-либо образца земной коры в среднем содержатся миллиарды атомов этого редчайшего элемента. А в теле человека? Известно, например, что поступление радия в организм человека с воздухом составляет примерно 1 фг (фемтограмм, квадриллионная часть грамма) в сутки. Нетрудно подсчитать, что каждую секунду в наши легкие попадает



Вода — соединение водорода с кислородом — уникальное вещество, оно присутствует на Земле в трех агрегатных состояниях.

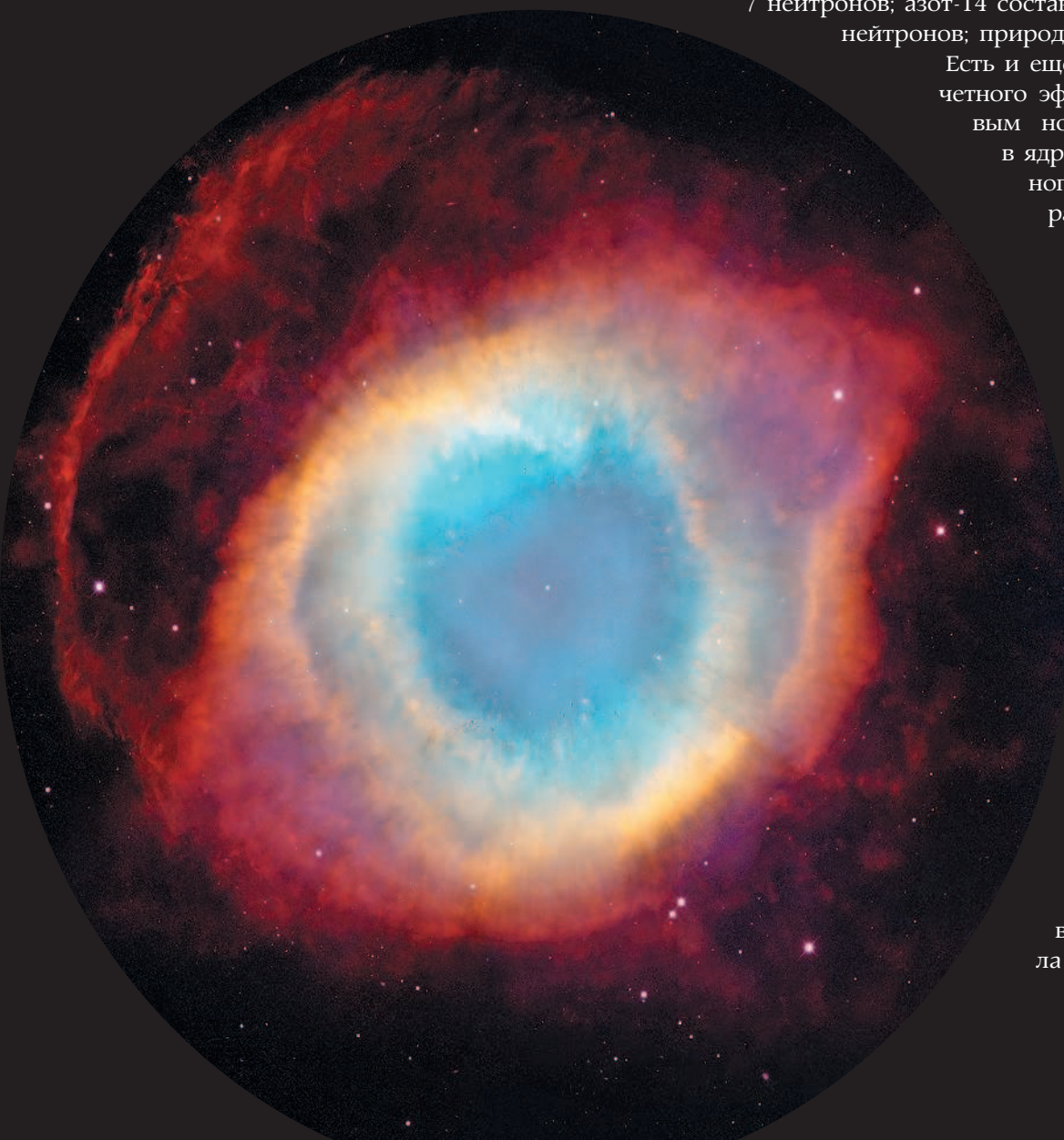


В.И. Вернадский — русский геохимик.



Все химические элементы образовались в звёздах.

Туманность Улитка в созвездии Водолея — конечная стадия эволюция звезды, похожей на наше Солнце. Снимок получен телескопом Хаббл.



с воздухом около 30 атомов радия! Всего же в теле человека в среднем содержится 30 пг (пикограммов, триллионных долей грамма) радия, или 80 миллиардов атомов!

Почему же одних элементов в земной коре много, а других мало? И почему в нашей Галактике (которая вряд ли сильно отличается от соседних) распределение элементов совершенно другое, чем в земной коре? Может возникнуть и такой вопрос: как и когда появились все химические элементы? Ответы на эти вопросы наука смогла дать только во второй половине XX века.

Когда подсчитали распространенность в земной коре стабильных изотопов всех элементов (их известно около 300) в зависимости от состава их ядер, то получилась очень интересная картина. Эти данные приведены в таблице (из нее исключен кислород, на который приходится половина массы).

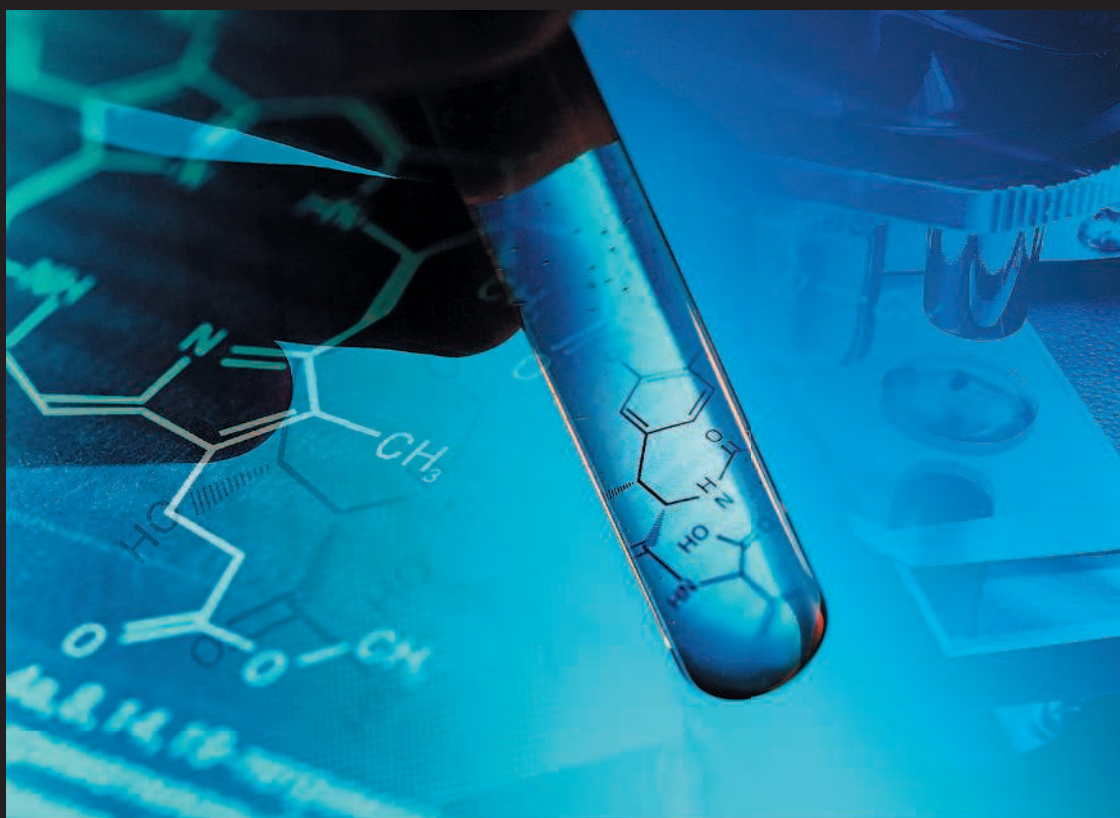
| ЧИСЛО ПРОТОНОВ В ЯДРЕ  | ЧЕТНОЕ | НЕЧЕТНОЕ | ЧЕТНОЕ   | НЕЧЕТНОЕ |
|------------------------|--------|----------|----------|----------|
| ЧИСЛО НЕЙТРОНОВ В ЯДРЕ | ЧЕТНОЕ | ЧЕТНОЕ   | НЕЧЕТНОЕ | НЕЧЕТНОЕ |
| ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ, %    | 21     | 26       | 1        | 0,03     |

Распространенность элемента зависит прежде всего от четности числа нейтронов в его ядре. Стабильных нечетно-нечетных ядер известно только четыре — это ядра дейтерия (1 протон, 1 нейтрон; природный водород содержит 0,02% дейтерия), лития-6 (3 протона, 3 нейтрона; содержание в природном литии 7,4%), азота-14 (7 протонов, 7 нейтронов; азот-14 составляет 99,6% всего азота), бора-10 (5 протонов, 5 нейтронов; природный бор содержит 19,7% бора-10).

Есть и еще одно очень интересное проявление «четно-нечетного эффекта». Многие элементы с нечетным порядковым номером, т. е. с нечетным числом протонов в ядре, — это элементы-одиночки: они состоят из одного лишь стабильного нуклида (все остальные радиоактивны). Таких элементов 19, среди них фтор-19, натрий-23, алюминий-27, фосфор-31, марганец-55, кобальт-59, иод-127, цезий-133, золото-197 и др. В то же время существует всего-навсего один четный элемент-одиночка — это бериллий ( $Z = 4$ ) с единственным стабильным нуклидом  ${}^9\text{Be}$ . Обычно же у элементов с четным порядковым номером  $Z$  есть несколько стабильных изотопов; рекорд принадлежит олову ( $Z = 50$ ): у него десять стабильных и еще больше радиоактивных изотопов.

Итак, самые стабильные ядра содержат четное число протонов и нейтронов. А среди этих ядер наиболее стабильные содержат 2, 8, 20, 28, 50, 82 или 126 протонов или нейтронов; такие числа называли магическими. Ядра  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  и ряд других являются дважды магическими (магическое число и протонов, и нейтронов), поэтому их во Вселенной относительно много.

Почему же одних элементов много, а других мало? И всегда ли так было? По современным представлениям Вселенная возникла в результате Большого взрыва. После взрыва



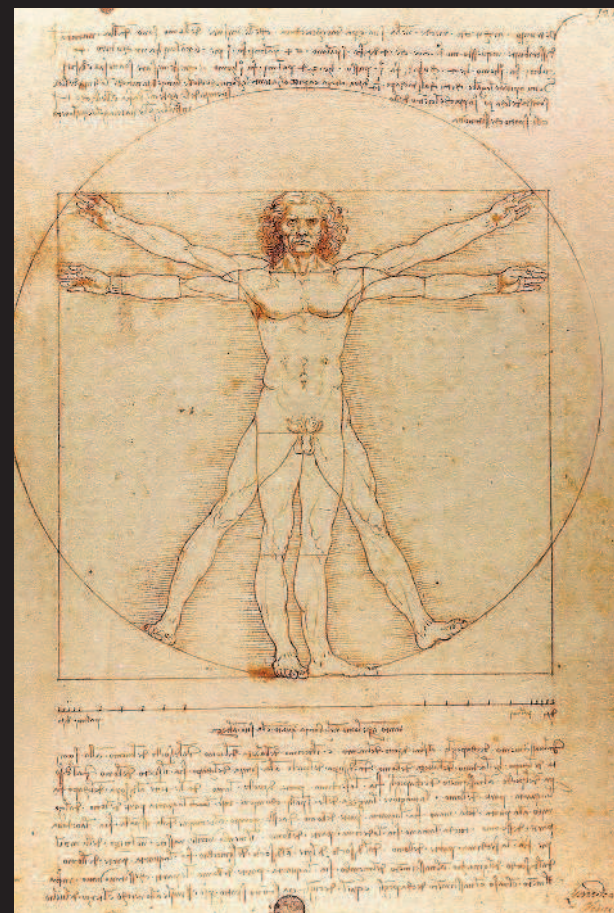
Органические вещества — соединения углерода с другими элементами — самый обширный класс химических соединений.

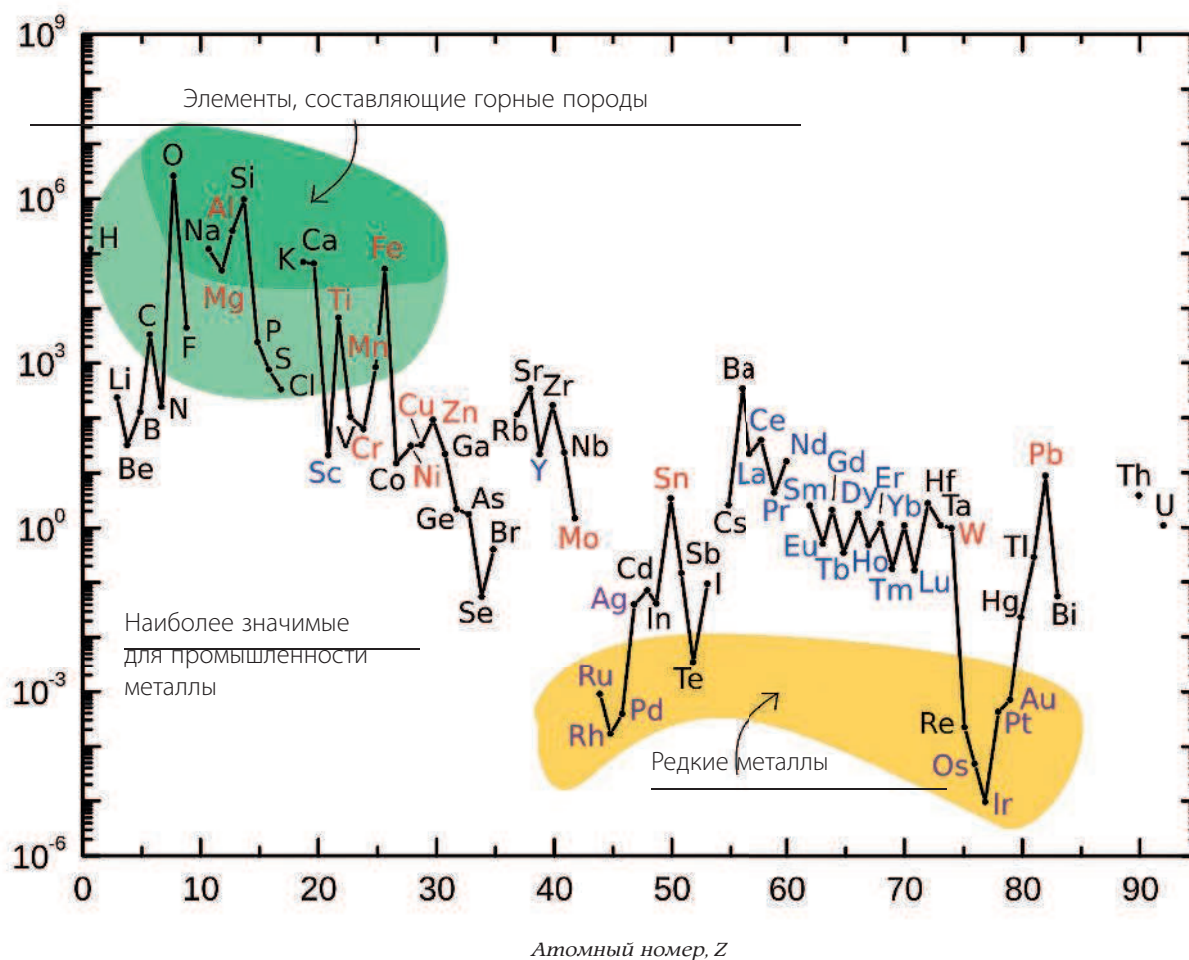
Рисунок Леонардо да Винчи «Витрувианский человек» (XV в.) показывает, что пропорции человеческого тела тоже математически определены.

сначала образовались протоны (ядра атомов водорода) и нейтроны. Спустя несколько минут после взрыва, когда температура снизилась до миллиарда градусов, начался процесс нуклеосинтеза — соединение протонов и нейтронов с образованием более тяжелых ядер. На первом этапе образовались в основном ядра гелия-4. В результате первичная Вселенная состояла из ядер водорода (примерно 75%) и гелия-4 с очень малой примесью ядер тяжелого водорода — дейтерия (D, один протон и один нейтрон), гелия-3 и лития-7. Вселенная продолжала расширяться, остывать и становилась все более разреженной. Когда температура стала ниже 10 000 градусов, электроны получили возможность соединяться с ядрами, образуя устойчивые атомы водорода и гелия.

Бесконечному расширению Вселенной противодействовали силы всемирного тяготения (гравитации). Гравитационное сжатие материи в разных частях разреженной Вселенной сопровождалось повторным сильным разогревом: энергия тяготения переходила в тепловую энергию. Наступила стадия массового образования первых звезд, которая продолжалась около 100 миллионов лет. Если при гравитационном сжатии температура достигала 10 миллионов градусов, начинался процесс термоядерного синтеза: ядра водорода ( $Z = 1$ ) сливались и превращались в гелий ( $Z = 2$ ). «Горение» водорода с образованием гелия — основная реакция, дающая энергию нашему Солнцу. При более высоких температурах идут реакции образования ядер лития ( $Z = 3$ ) и некоторых более тяжелых элементов. Все эти реакции сопровождаются выделением огромного количества энергии — в виде излучения звезды. (Реакции слияния ядер идут и при взрыве водородной бомбы.) Пока в звезде идут реакции синтеза, излучение уравнивает гравитационное сжатие звезды.

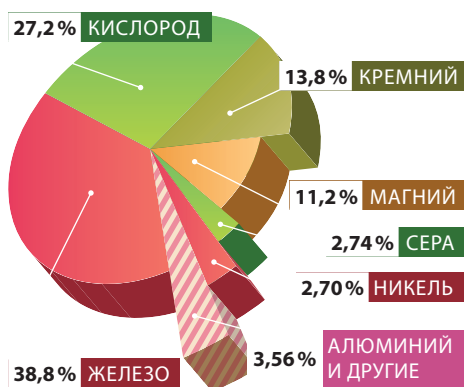
Когда заметная часть водорода в звезде «выгорает», синтез гелия замедляется, связанное с ним излучение уже не может уравновесить гравитацию огромной массы. Силы гравитации вновь сжимают и разогревают звезду, и при температуре 150 миллионов градусов в ее самой горячей центральной части происходит слияние ядер гелия с образованием ядер углерода ( $Z = 6$ ). А во внешних более холодных слоях



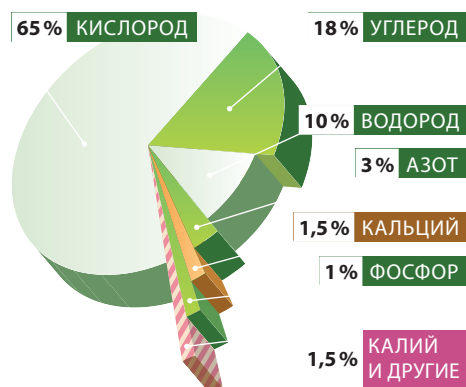


На рисунке показано, сколько атомов разных элементов приходится в земной коре на миллион атомов кремния. В левой верхней части находятся элементы, составляющие основу горных пород, в правой нижней части расположены самые редкие металлы. Красным цветом выделены символы наиболее важных для промышленности металлов, фиолетовым — драгоценные металлы, синим — редко-земельные элементы.

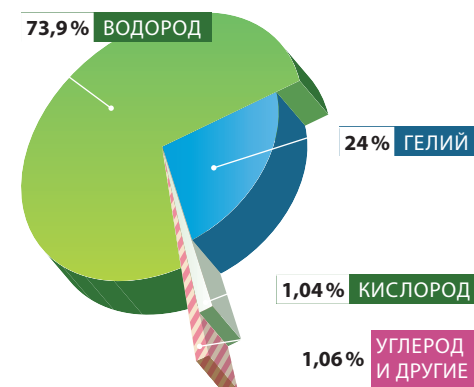
Состав внутренних слоев Земли неизвестен. Тем не менее делались попытки оценить кларки всего земного шара в целом. И тогда на первое место выходит железо! Потому что его много в ядре Земли.



Распределение химических элементов в организме человека (в процентах по массе) иное (даны приблизительные числа, так как все люди разные; особенно это касается более редких элементов).



Совершенно другая картина получается для распространенности элементов в космосе, точнее, в нашей Галактике (также в процентах по массе):



звезды продолжается синтез гелия из водорода. После полного исчерпания запасов гелия наступает следующий этап сжатия звезды силами гравитации. И если масса звезды в несколько раз больше массы Солнца, она может разогреться до миллиарда градусов и выше. При таких температурах происходит синтез более тяжелых ядер. Выделяющаяся в этих процессах энергия в виде излучения сильно «раздувает» внешние слои старых звезд. Звездный ветер, «дующий» с их поверхности, выносит в космическое пространство синтезированные этими звездами химические элементы. По образному выражению, звезды — это ядерные костры, зола которых — химические элементы. Если же масса звезды не очень велика (как у нашего Солнца), температура на ней недостаточно высокая, чтобы углерод и кислород вступили в дальнейшие реакции ядерного синтеза; такая звезда может стабильно излучать очень долго — миллиарды лет.

Синтез ядер в звездах может дать только элементы с атомными номерами не более  $Z = 26, 27, 28$  (железо, кобальт, никель). Так что атомы железа в нашей крови когда-то были синтезированы в звездах! Как же появились в природе все остальные химические элементы? И как они попали из звезд на Землю, в том числе в тело человека?

Если масса звезды в десять раз больше, чем у Солнца, температура в ее центральной части становится такой высокой, что там синтезируются ядра вплоть до железа ( $Z = 26$ ) и никеля ( $Z = 28$ ). Из всех химических элементов эти ядра самые стабильные. Это значит, что реакции слияния ядер и синтеза более легких, чем железо, элементов идут с выделением энергии, тогда как синтез более тяжелых элементов требует затрат энергии. Поэтому в звездах, достигших «железной» стадии развития, происходят драматические события: вместо выделения энергии идет ее поглощение, что сопровождается быстрым понижением температуры и светимости. А сама звезда сжимается до очень маленького объема; этот процесс называется гравитационным коллапсом (от *лат.* collapses — ослабевший, одряхлевший, разрушенный). В этом процессе образуется большое число нейтронов, которые благодаря отсутствию заряда легко проникают в ядра всех имеющихся элементов, в том числе железа и его соседей. В ядре избыточный нейтрон превращается в протон (их массы близки). Но протон заряжен, поэтому в результате такого процесса из элемента с номером  $Z$  образуется элемент с номером  $Z + 1$ . Так появляются все более тяжелые химические элементы, следующие за железом.

Коллапс звезды заканчивается грандиозным взрывом, при котором в космическое пространство выбрасывается до 90% ее массы.

Так появляется сверхновая звезда (обычно говорят просто «сверхновая»), яркость которой может быть больше суммарной яркости миллиардов звезд. Невооруженным глазом за последние 2000 лет люди видели не менее десяти сверхновых. Одну из них описали китайские и арабские астрономы в 1054 г., эта сверхновая дала Крабовидную туманность. В результате горения и взрыва звезд множество химических элементов попадает в межзвездную среду. А дальше все повторяется сначала: остатки сверхновых конденсируются в плотные образования, из которых под действием гравитационных сил возникают звезды нового поколения. Эти звезды (к ним принадлежит и наше Солнце) с самого начала уже содержат в своем составе примесь тяжелых элементов. Эти же элементы содержатся и в окружающем эти звезды газопылевых облаках, из которых образуются планеты. И если с момента Большого взрыва прошло около 14 миллиардов лет, то возраст Солнечной системы значительно меньше — около 5 миллиардов лет.

Существует общее правило — чем больше заряд ядра  $Z$ , то есть чем оно тяжелее, тем меньше таких нуклидов во Вселенной. Однако это правило выполняется не всегда. Например, в земной коре мало легких нуклидов  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ . Предполагают, что эти нуклиды по ряду причин не могут образоваться в недрах звезд, а «откальваются» от более тяжелых ядер в межзвездном пространстве под действием космических лучей. Таким образом, соотношение различных элементов на Земле — отголосок бурных процессов в космосе, которые происходили миллиарды лет назад, на более поздних этапах развития Вселенной.



Магнитное поле Земли защищает планету от губительного для живых организмов солнечного ветра.