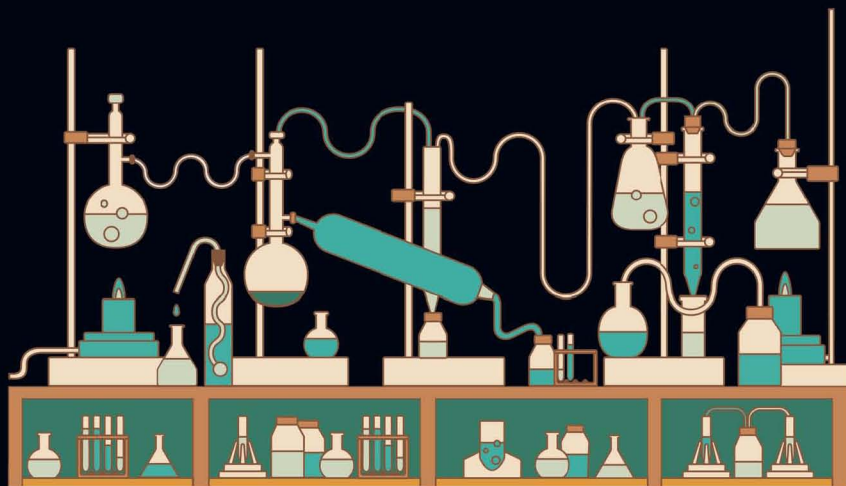


50 ИДЕЙ,  
*о которых нужно знать*

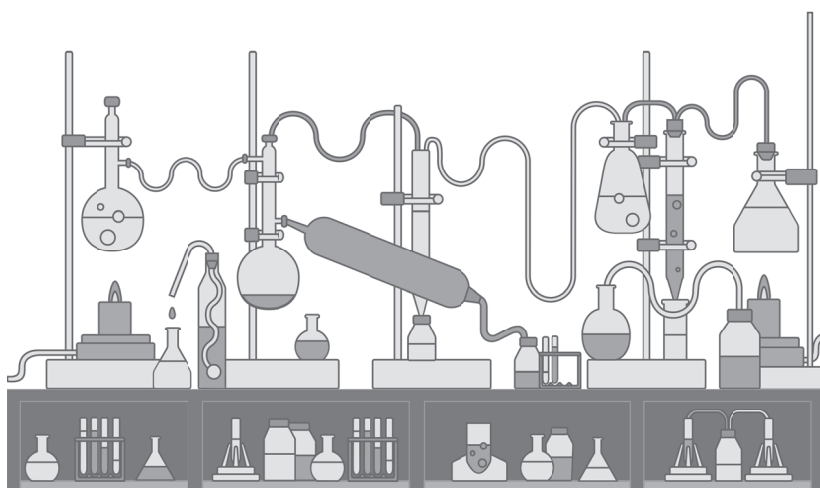
# ХИМИЯ



Хэйли Бёрч

Хэйли Бёрч

# ХИМИЯ



# 50 ИДЕЙ,

*о которых нужно знать*

 phantom press

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Вступление	3	27 Вычислительная химия	108
01 Атомы	4	28 Углерод	112
02 Простые вещества	8	29 Вода	116
03 Изотопы	12	30 Происхождение жизни	120
04 Сложные вещества	16	31 Астрохимия	124
05 Как это все крепится	20	32 Белки	128
06 От фазы к фазе	24	33 Действие ферментов	132
07 Энергия	28	34 Сахара	136
08 Химические реакции	32	35 ДНК	140
09 Равновесие	36	36 Биосинтез	144
10 Термодинамика	40	37 Фотосинтез	148
11 Кислоты	44	38 Химические посредники	152
12 Катализаторы	48	39 Бензин	156
13 Окисление-восстановление	52	40 Пластмассы	160
14 Брожение	56	41 ХФУ	164
15 Крекинг	60	42 Композиты	168
16 Химический синтез	64	43 Солнечные батареи	172
17 Процесс Габера	68	44 Лекарства	176
18 Хиральность	72	45 Нанотехнологии	180
19 Зеленая химия	76	46 Графен	184
20 Разделение	80	47 Трехмерная печать	188
21 Спектры	84	48 Искусственные мышцы	192
22 Кристаллография	88	49 Синтетическая биология	196
23 Электролиз	92	50 Топливо будущего	200
24 Микротехнология	96	Периодическая таблица	204
25 Самосборка	100	Предметный указатель	206
26 Лаборатория в чипе	104		

# ВСТУПЛЕНИЕ

**Х**имию часто считают наукой-недотепой. Совсем недавно разговаривала я с одним химиком, и та пожаловалась, как же ей надоело, что о ее предмете думают примерно так: «Какие-то люди у себя в лабораториях возятся со всякими вонючими штуками». Химию почему-то полагают не такой важной, как биология, и менее интересной, чем физика.

Моя задача как автора книги о химии — помочь вам отбросить это представление и благоволить «недотепе». Пусть мало кто об этом знает, но вообще-то химия — лучшая из наук.

Химия — суть едва ли не всего, что нас окружает. Из ее строительного материала — атомов, молекул, веществ и смесей — состоит вся материя на этой планете, до последней унции. Химические реакции — это жизнь и творение всего, от чего жизнь зависит. Химические продукты — летопись прогресса нашего современного существования, начиная с пива и заканчивая утягивающими трусами из лайкры.

Полагаю, столь невыгодный образ химии сложился вот почему: вместо того чтобы увлечь содержательным и интересным в ней, нас нагружают всякими правилами, по которым химия действует, формулами молекулярных структур, прописями химических реакций и тому подобным. Химики-то пусть говорят, что эти правила и прописи — штука важная, но у большинства людей они восторженного интереса все-таки не пробуждают.

И потому в этой книге мы эти самые правила подробно разбирать не будем. Захотите — найдете их в других изданиях. Я в основном сосредоточилась на том, что мне в химии кажется важным и интересным. Именно так увлек меня этой наукой мой учитель химии, мистер Смэйлз. Он показал мне, как делаются мыло и нейлон, — а еще он носил замечательные галстуки.

# 01

## АТОМЫ

Атомы — строительный материал и химии, и всей нашей Вселенной. Из них состоят простые вещества, планеты, звезды — и мы с вами. Поняв, как устроены атомы и как именно они взаимодействуют, можно разобраться практически во всем, что происходит в химических реакциях — и лабораторно, и в природе.

**Ш**ироко известно высказывание Билла Брайсона\* — он писал, что в любом из нас может быть до миллиарда атомов, которые прежде слагали Уильяма Шекспира. «Ух ты, — думаете вы, — целый миллиард атомов покойного Шекспира!» Ну, миллиард-то он миллиард, и все же... С одной стороны, любой из нас проживает к своему 33-летию примерно 1 000 000 000 секунд. С другой — миллиард крупинок соли поместится в обычную ванну, но миллиард при этом — это одна миллиардная миллиардной общего числа атомов в одном человеческом теле. Что более или менее иллюстрирует, сколь мал атом: в одном только вашем теле их миллиард миллиардов миллиардов, и, стало быть, атомов покойного Шекспира в вас не хватит даже на одну клетку мозга.

\* Уильям Стэнли «Билл» Брайсон (р. 1929) — англиканский священник, занимавший высокие церковные посты по обе стороны Атлантики. —  
Здесь и далее примечания переводчика; транскрипция имен собственных, соответствующая современным произносительным нормам, приводится в квадратных скобках при первом упоминании.

### ЖИЗНЬ — ПЕРСИК

Атомы до того малы, что до недавнего времени их нельзя было увидеть. Разработка микроскопов сверхвысокого разрешения изменила ситуацию, и в 2012 году австралийские ученые смогли сделать фотографию тени, которую отбрасывает один-единственный атом. Но химикам и не требовалось видеть атомы, чтобы понимать: на некоем глубинном уровне устройство атома объясняет почти все, что случается и в лаборатории, и в жизни. Много чего в химии

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Около 400 до н. э.	1803	1904	1911
Греческий философ Демокрит описывает незримые частицы, подобные атому	Джон Дальтон [Долтон] выдвигает атомистическую теорию	Джозеф Джон Томсон предлагает модель устройства атома («сливовый пудинг»)	Эрнест Резерфорд [Разерфорд] описывает атомное ядро

еще тоньше и происходит на уровне частиц под названием «электроны»; из них состоит внешнее пространство атома.

Если бы можно было взять атом в ладонь, словно персик, косточка была бы ядром, состоящим из протонов и нейтронов, а сочная мякоть — электронами. Более того, будь персик атомом, получилась бы сплошь мякоть, а косточка оказалась бы такой маленькой, что вы проглотили бы ее, не заметив, потому что большая часть атома состоит из электронов. Но именно сердцевина атома стягивает его воедино. В ней находятся протоны — положительно заряженные частицы, которые не дают отрицательно заряженным частицам — электронам — разлететься во все стороны.

### Атомистическая теория и химические реакции

В 1803 году английский химик Джон Дальтон прочитал лекцию, в которой выдвинул теорию, согласно которой материя состоит из неуничтожимых частиц — атомов. Дальтон, по сути, сказал, что в состав каждого простого вещества входят атомы определенного вида и они могут образовывать сложные вещества, и что химические реакции суть перестановка этих самых атомов.

### ПОЧЕМУ АТОМ КИСЛОРОДА — ЭТО АТОМ КИСЛОРОДА

Не все атомы одинаковы. Вы, возможно, уже поняли, что у атома с персиком не так уж много общего, но давайте все же разоведем эту аналогию. Атомы бывают разные — с разными вкусами. Пусть наш персик будет атом кислорода, тогда слива, скажем, — это атом углерода. И тот и другая — маленькие округлые предметы, наполненные электронами, которые окружают протонную косточку, однако свойства у них очень разные. Атомы кислорода болтаются в воздухе парами ( $O_2$ ), а атомы углерода (C) могут соединяться в большие группы и образовывать твердые вещества — например, алмаз или графит, как в карандашном грифеле. Кислород и углерод — разные химические элементы (см. с. 8), потому что ядра их содержат разное число протонов. У кислорода их восемь, это на два больше, чем у углерода. Большие, тяжелые ядра элементов вроде сиборгия или нобелия содержат более сотни протонов.

**1989**

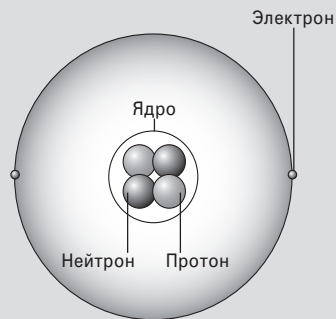
Исследователи из компании «Ай-би-эм» выкладывают аббревиатуру IBM из отдельных атомов

**2012**

Открытие бозона Хиггса [Хиггза] расширяет стандартную модель атома

## Вдадимся в подробности

Ранняя модель атома Дж. Дж. Томсона — «сливовый пудинг» — представляла атом как рыхлый положительно заряженный «пудинг», в котором равномерно распределены «сливы» — отрицательные заряды (электроны). Эта модель со временем изменилась: ныне мы знаем, что протоны и другие субатомные частицы под названием «нейтроны» образуют крошечный плотный центр атома, а электроны — окружающее их облако. Вдобавок нам известно, что в протонах и нейтронах есть кварки — частицы еще меньше. Химики на этих мельчайших частицах не задерживают внимание — это занятие для физиков, которые растаскивают атомы на составляющие и ищут новые субатомные компоненты с помощью ускорителей элементарных частиц. Однако важно помнить, что научная модель атома и того, как устроена материя во Вселенной, все еще развивается. Открытие бозона Хиггса в 2012 году, к примеру, подтвердило существование частицы, которую физики к тому времени уже включили в свою модель и учитывали при составлении прогнозов о существовании других частиц. И все же еще предстоит определить, тот ли это вид бозонов Хиггса, который они искали.



Невероятно плотное ядро атома содержит положительно заряженные частицы (протоны) и незаряженные (нейтроны), а вокруг на орбитах располагаются отрицательно заряженные частицы (электроны).

Когда в такое ничтожно малое пространство напихано столько взаимно отталкивающихся положительных зарядов, равновесие очень шатко, его легко нарушить, и поэтому ядра тяжелых элементов нестабильны. Обычно в атоме, какого бы сорта он ни был, электронов столько же, сколько протонов в ядре. Если электрон теряется или приобретает, положительный и отрицательный заряды перестают уравниваться и атом превращается в ион — заряженную частицу. Ионы играют в веществе важную роль: без их взаимодействий многие вещества просто не существовали бы.

### КИРПИЧИКИ ЖИЗНИ

Атомы входят в состав не только содержимого кухонного буфета, но и всего, что ползает, дышит и пускает корни; из атомов состоят молекулы потрясающей сложности — ДНК и белки у нас в мышцах, костях и волосах. Им это удастся благодаря связям с другими атомами (см. с. 20).

Но вот что интересно в жизни всей нашей планеты: несмотря на невероятное разнообразие, в ней всегда есть атомы одной разновидности — углеродные.

От бактерии, сражающейся за выживание у бурлящего жерла вулкана в глубочайших, мрачнейших углах Мирового океана, до птиц, парящих в небесах, — нет такого живого существа на планете, в котором нет атомов углерода. Однако, поскольку мы еще не обнаружили жизнь на других планетах, сказать, случайность ли — такая эволюция жизни, способна ли она существовать на основе другого элемента, мы не можем. Поклонники научной фантастики хорошо разбираются в альтернативных биологиях: инопланетные формы жизни — существа на основе кремния — фигурируют в «Звездном пути» и «Звездных войнах».

### АТОМ ЗА АТОМОМ

Развитие нанотехнологий (см. с. 180), которые обещают много разного — от более эффективных солнечных батарей до лекарств, которые отыскивают и уничтожают раковые клетки, — привлекло к атому пристальное внимание. Инструменты нанотехнологий оперируют в масштабах одной миллиардной метра, что по-прежнему крупнее отдельного атома, однако такой масштаб позволяет мыслить в категориях перестановок отдельных атомов и молекул. В 2013 году исследователи из компании IBM создали покадровый анимационный фильм, в котором мальчик играет с мячом. И мальчик, и мяч составлены из отдельных атомов меди, и все их в фильме видно. Ни с чем мельче человечество за всю свою историю не возилось. Наука наконец начинает работать в масштабах, соответствующих видению нашего мира у химиков.

**КРАСОТА ЖИВОГО — НЕ АТОМЫ  
В ЕГО СОСТАВЕ, А ТО, КАК ЭТИ  
АТОМЫ СОБРАНЫ ВОЕДИНО**

Карл Саган [Сэйгэн] (1934–1996),  
американский астроном, астрофизик,  
популяризатор науки

**В сухом остатке:**

**Кирпичики**



# 02

## Простые вещества

Ради открытия новых простых веществ — то есть состоящих из атомов одного химического элемента — химики пускаются во все тяжкие. Периодическая таблица элементов подсказывает нам, в каком примерно порядке происходили открытия, но это не просто список элементов. Закономерности Периодической таблицы описывают природу простых веществ, а также особенности их взаимодействия друг с другом.

**Н**емецкий алхимик XVII века Хенниг Бранд (ок. 1630 — ок. 1710) был золотоискателем. Женившись, он бросил службу в армии и вложил приданое жены в поиски философского камня — мифического вещества или минерала, о котором алхимики грезили многие века. Легенда гласит, что философский камень способен трансмутировать обычные металлы вроде железа или свинца в золото. После смерти первой супруги Бранд нашел себе вторую и продолжил поиски в том же духе. Судя по всему, он решил, что философский камень можно синтезировать из телесных жидкостей, и приобрел ни много ни мало 1500 галлонов человеческой мочи, из которой вознамерился экстрагировать волшебное вещество. Наконец в 1669 году он сделал поразительное открытие, хоть и не философского камня. В ходе экспериментов, при кипячении и упаривании мочи, Бранд нечаянно стал первым человеком, получившим простое вещество с применением химических методов.

Бранд добыл вещество, содержащее фосфор, которое он назвал холодным огнем, потому что оно светилось в темноте. Но простым веществом фосфор признали только в 1770-х годах. К тому времени простые

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1669**

Первое простое вещество (фосфор) выделено химическими методами

**1869**

Д. И. Менделеев обнаруживает первый вариант Периодической таблицы

**1913**

Генри [Хенри] Моузли определяет простые вещества по их атомному числу

вещества открывали сплошь и рядом: всего за десятилетие химики выделили кислород, азот, хлор и марганец.

В 1869 году, через два века после открытия Бранда, русский химик Дмитрий Менделеев составил Периодическую таблицу, и фосфор занял в ней положенное ему место — между кремнием и серой.

### ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕМЕНТ?

В истории до сравнительно недавнего времени элементами считали огонь, воздух, воду и землю. Загадочный пятый элемент — эфир — добавили, чтобы как-то описать состав звезд, поскольку, с точки зрения философа Аристотеля, из земных элементов они состоять не могут. Слово «элемент» происходит от латинского *elementum*, что означает «первый принцип», или «простейшая форма», — неплохое описание, однако оно все же не объясняет разницу между элементом и простым веществом.

А разница вот в чем. Простое вещество — форма существования атомов определенного химического элемента, а химический элемент — совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра. Кусок Брандова фосфора — ядовитого вещества и составляющей одного нервно-паралитического газа, так уж вышло, — состоит из атомов одного химического элемента. Что интересно, не все куски фосфора выглядят одинаково, потому что атомы фосфора могут быть организованы по-разному, из-за чего меняется не только внутреннее устройство вещества, но и его внешний вид. В зависимости от того, как именно организованы его атомы, фосфор бывает белый, черный, красный или фиолетовый. Эти разновидности и ведут себя по-разному — например, температуры плавления у них сильно разнятся. Белый фосфор плавится на солнце в жаркий день, а черный придется для этого греть до 600 °C в ревущей домне. Хотя и тот и другой состоят из одних и тех же атомов с составом из 15 протонов и 15 электронов.

### Расшифруем Периодическую таблицу

В Периодической таблице (см. с. 204–205) элементы обозначены буквами. Некоторые аббревиатуры очевидны: например, Na — натрий. Зато другие — допустим, As (мышьяк) — не сразу понятно, откуда взялись. Число над буквой — массовое, оно соответствует числу нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре атома этого элемента. Нижний индекс — число протонов (атомное число).

**1937**

Впервые искусственно получены атомы нового химического элемента — технеция

**2000**

Русские ученые синтезируют атомы нового сверхтяжелого химического элемента — ливермория

**2010**

Открытие элемента с атомным числом 117 — унунсептия

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ

На несведущий взгляд, Периодическая таблица (см. с. 204–205) представляется эдакой оригинальной игрой «Тетрис», где, в зависимости от того, на какую версию вы смотрите, те или иные детальки не долетели до дна. На первый взгляд в таблице не мешало бы навести порядок. На самом же деле этот сумбур строго упорядочен, и в кажущемся кавардаке любому химику по силам быстро отыскать нужные сведения. А все оттого, что в этой хитрой схеме содержатся скрытые закономерности, объединяющие элементы в соответствии с их атомным устройством и химическим поведением.

Вдоль рядов таблицы слева направо элементы выстроены по порядку атомного числа — количества протонов в ядре атома элемента. Однако гений Менделеева распознал, что свойства элементов с определенного места в таблице начинают повторяться и следует начать новый ряд. Соответственно,

из столбцов можно извлечь более подробные сведения о том или ином элементе и его простых веществах. Возьмем столбец (группу) справа, от гелия до радона. Это благородные (инертные) газы, бесцветные и при нормальных условиях\* чрезвычайно ленивые в отношении каких бы то ни было химических взаимодействий. Неон, к примеру, до того неактивен, что его никак не заставишь

создать химическое соединение ни с каким другим веществом. Причина такого безразличия — в электронном устройстве атомов неона. Если представить модель атома упрощенно, внутри любого атома электроны располагаются на определенных концентрических оболочках — и лишь в определенном количестве. Если оболочка уже заполнена, электроны занимают следующий слой, отстоящий от ядра дальше. Поскольку число электронов в атоме возрастает от элемента к элементу по мере увеличения атомного числа, у атома каждого элемента — своя электронная конфигурация. Ключевая особенность благородных газов в том, что их внешние оболочки заполнены. Такая структура очень устойчива, то есть электроны трудно вовлечь в какие бы то ни было взаимодействия.

В Периодической таблице много и других закономерностей. При движении вдоль ряда слева направо, к инертным газам, вырвать электрон из атома делается все труднее (требуется больше энергии); то же верно и при движении снизу вверх.

## МИР ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПОДОБЕН ТЕАТРАЛЬНОЙ СЦЕНЕ... АКТЕРЫ — ВЕЩЕСТВА

Клеменс Александр Винклер  
(1838–1904), немецкий химик-технолог,  
первооткрыватель элемента германия

\* Нормальными  
условиями  
принято считать  
давление  $10^5$  Па  
и температуру  
 $273\text{ К}$  ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Середина таблицы занята в основном металлами, и по мере приближения к нижнему левому углу они делаются все более металлическими. Применяя понимание этих закономерностей, химики предсказывают, как поведут себя в химических реакциях те или иные простые вещества.

## СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ

У химии с боксом мало общего, но одно их роднит: и там и там есть свои чемпионы-сверхтяжеловесы. Те, что «в цыплячьем весе», плавают сверху Периодической таблицы — у атомов водорода и гелия на двоих всего три протона, зато те, что внизу, затонули под тяжестью своего атомного груза. Таблица за многие годы разрослась и включила в себя вновь открытые элементы, все весомее и весомее. Однако номером 92 — радиоактивным элементом ураном — завершается ряд элементов, находимых в природе. И хотя в результате нейтронного захвата с последующим бета-распадом образуется плутоний, его количества в естественных условиях исчезающе малы. Плутоний обнаружили в ядерном реакторе, а другие сверхтяжелые атомы получены столкновением атомов более легких элементов в ускорителях элементарных частиц. Охота еще не закончена, однако в любом случае она теперь намного заковыристей, чем упаривание телесных жидкостей.

## Охота на тяжелейшего среди сверхтяжелых

Жулики не нравятся никому, но они есть в любой профессии, и ученые — не исключение. В 1999 году исследователи из Национальной лаборатории имени Лоренса в Беркли (Калифорния) опубликовали статью, посвященную открытию сверхтяжелых элементов № 116 (ливерморий) и № 118 (унуноктий). Но что-то в той статье не сходилось. Другие ученые, ознакомившись с новостью, попытались повторить представленные калифорнийцами эксперименты, но, как ни старались, им не удалось получить ни единого атома элемента № 116. Оказалось, что один из «первооткрывателей» фальсифицировал данные, в результате чего некоему правительственному агентству в США, профинансировавшему эти исследования, пришлось с позором отказаться от заявлений о прорыве в мировой науке. Статью изъяли, а лавры открытия ливермория достались группе русских исследователей годом позже. Ученого, подделавшего данные, уволили. Вот каков престиж открытия нового элемента в наши дни. Исследователи ради этого готовы ставить на кон всю свою карьеру.

## В сухом остатке:

## Простейшие вещества

# 03 Изотопы

Изотопы — это не только смертоносные вещества, из которых делают бомбы и которыми травят людей. Понятие «изотоп» относится ко многим простым веществам со слегка расширенной порцией субатомных частиц. Изотопы есть в воздухе, которым мы дышим, и в воде, которую пьем. Можно даже (совершенно безопасно) сделать из них тонуций лед.

**Л**ед плавает? Ха! Все атомы одного химического элемента одинаковые — но разные. Возьмем простейшее вещество — водород: у всех атомов этого элемента один протон и один электрон. Атом водорода не был бы атомом водорода, не располагайся у него в ядре один протон. А что, если к этому одинокому протону добавить нейтрон? Останется ли водород водородом?

Нейтроны — недостающий фрагмент головоломки, морочивший голову химикам и физикам вплоть до 1930-х годов (см. «Недостающие нейтроны», с. 13). Эти нейтральные частицы никак не влияют на общее равновесие зарядов в атоме, но чувствительно меняют массу атома. Если в ядро водорода добавить два нейтрона, лед будет тонуть.

## ТЯЖЕЛАЯ ВОДА

Если сунуть в атом водорода нейтрон, разница получится ощутимая, ибо для легких атомов это удвоение порции нуклонов. В результате получается «тяжелый водород» — дейтерий (D, или  $^2\text{H}$ ), и, подобно обычному водороду, атомы дейтерия с атомами кислорода образуют воду. Конечно, вода получается необычная — в нее входит водород с дополнительным нейтроном, то есть это «тяжелая вода» ( $\text{D}_2\text{O}$ , а не  $\text{H}_2\text{O}$ ), или, точнее, оксид дейтерия. Если взять тяжелую воду — ее

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1500-е**

Алхимики пытаются трансмутировать вещества в драгоценные металлы

**1896**

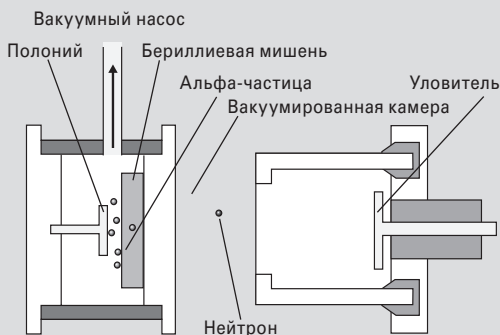
Первое применение радиации при лечении рака

**1920**

Первое описание «незряженных двойников» (нейтронов) Эрнестом Резерфордом

## Недостающие нейтроны

Открытие нейтронов физиком Джеймсом Чедвиком [Чэдуиком], который далее продолжил работать над созданием атомной бомбы, объяснило докучливую неувязку с массой атомов. Прежде было очевидно, что атомы тяжелее, чем должны быть. Чедвик считал, что атом никак не может столько весить, если у него в ядре одни лишь протоны. Словно атомы элементов отправляются на каникулы с чемоданами, набитыми кирпичами. Только кирпичей этих найти никто не мог. Наставник Чедвика, Эрнест Резерфорд, убедил его, что атомы втихаря таскают при себе какие-то субатомные частицы. В 1920 году Резерфорд назвал эти незаряженные двойники нейтронами. Но Чедвик искал отчетливое подтверждение своей теории аж до 1932 года. Он обнаружил, что, если бомбардировать серебристый металл бериллий радиоактивным излучением полония, можно заставить атомы бериллия испускать незаряженные субатомные частицы — нейтроны.



Реакция, выбивающая нейтроны (n) из бериллиевой мишени:  ${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$

легко приобрести в интернете — и заморозить в формочке для льда, а потом бросить в стакан с простой водой, полученный лед утонет! Можете для сравнения добавить в тот же стакан кубик обычного льда и подивиться разнице, которая возникает из-за одной субатомной частицы на атом.

В природе каждый из примерно 6400 атомов водорода наделен дополнительным нейтроном. Есть, впрочем, третий тип, или изотоп, водорода — куда более редкий, и иметь с ним дело в домашних условиях несколько менее безопасно. Тритий — изотоп водорода, в атомах которого содержится по одному протону и по два нейтрона. Тритий нестабилен и, как и другие радиоактивные элементы, претерпевает радиоактивный распад. Его применяют в пусковых механизмах водородных бомб.

**1932**

Джеймс Чедвик открывает нейтрон

**1960**

Нобелевская премия по химии присуждена Уилларду Либби за радиоуглеродную датировку с применением углерода-14

**2006**

Александр Литвиненко умирает от отравления радиоактивным полонием

## РАДИОАКТИВНОСТЬ

Часто перед словом «изотоп» стоит слово «радиоактивный», и поэтому может показаться, что все изотопы радиоактивны. Это не так. Как мы только что убедились, существует совершенно не радиоактивный, то есть стабильный, изотоп водорода. Также существуют стабильные изотопы углерода, кислорода и других находимых в природе атомов.

Неустойчивые радиоактивные изотопы распадаются, то есть их атомы разлагаются на части — сбрасывают протоны, нейтроны и электроны. В результате их атомное число меняется, и они превращаются в атомы совсем иных химических элементов. Алхимики XVI–XVII веков сочли бы это волшебством — они же и искали пути превращения атомов одних элементов в другие (в идеале — в золото).

Атомы всех радиоактивных элементов распадаются с разной скоростью. Углерод-14, разновидность углерода с 14, а не с 12, как обычно, нейтронами в ядре, безопасен в обращении и без всяких специальных предосторожностей. Если взвесить грамм углерода-14 и оставить образец на подоконнике, ждать распада придется долго: на распад примерно половины атомов этого образца потребуется 5700 лет. Такая мера времени жизни — или скорости разложения — именуется периодом полураспада. У по-

лония-214, напротив, период полураспада составляет одну тысячную секунды, а это значит, что в какой-нибудь параллельной действительности, где вам разрешат отметить грамм радиоактивного полония, вы его даже до подоконника не донесете — он уже напрочь распадется.

### Виды радиоактивного излучения

Альфа-излучение — поток ядер, состоящих из двух протонов и двух нейтронов, что отвечает составу ядра атома гелия. Это слабое излучение, защититься от него можно и листком бумаги. Бета-излучение — поток быстрых электронов, оно способно проникнуть под кожу человека. Гамма-излучение — электромагнитная энергия, подобная свету, отгородиться от него можно толстым слоем свинца. Гамма-излучение очень вредно; интенсивным гамма-излучением уничтожают раковые опухоли.

Бывший русский шпион Александр Литвиненко и, возможно, палестинский лидер Ясер Арафат были убиты более стабильным изотопом полония, который распадается за несколько дней, а не за несколько секунд, но все равно смертоносен. В человеческом теле радиоактивное излучение, испускаемое при распаде полония-210, раздирает клетки и причиняет боли, недомогания и отказ иммунной системы.

Расследуя эти смерти, ученые выискивали продукты распада полония, поскольку атомов самого полония не остается ни одного.

## НАЗАД В БУДУЩЕЕ

Радиоактивные изотопы могут быть смертоносны, однако они же в силах помочь нам понять наше прошлое. У углерода-14, который мы бросили потихоньку распадаться на подоконнике, есть парочка способов применения в науке: во-первых, радиоуглеродная датировка ископаемых окаменелостей, а во-вторых, получение сведений о климате прошлого. Поскольку мы уже знаем, сколько времени требуется радиоактивным изотопам на распад, ученые умеют устанавливать возраст ископаемых предметов, мертвых животных и древнего воздуха, сохранившегося во льдах, анализируя количества различных изотопов. Любое животное за жизнь вдыхает небольшие количества естественно существующего углерода-14, входящего в состав диоксида углерода. Усвоение этого изотопа прекращается со смертью животного, и углерод-14 у него в организме начинает распадаться. Поскольку ученые знают, что период полураспада углерода-14 — 5700 лет, они могут вычислить, когда это окаменелое животное умерло.

Когда в ледяных шапках или ледниках, замерзших тысячелетия назад, бурят отверстия, мы получаем готовую шкалу времени атмосферных изменений, основанную на составе содержащихся во льдах изотопов. Подобные наблюдения за прошлым нашей планеты могут позволить нам предсказать, что случится с Землей в грядущем, поскольку содержание диоксида углерода продолжает меняться.

## РЕДКОЕ ОТКРЫТИЕ В ХИМИИ ОКАЗЫВАЕТ СТОЛЬ СИЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА МЫСЛЬ В СТОЛЬ МНОГИХ ОБЛАСТЯХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ЖИЗНИ

Арне Вестгрен (1889–1975),  
шведский кристаллограф,  
материаловед, на вручении Нобелевской  
премии по химии Уилларду Либби  
за открытие радиоуглеродного анализа

## В сухом остатке: Один нейтрон — большая разница



# 04

## Сложные вещества

В химии есть вещества, состоящие из атомов одного элемента, а есть и такие, в состав которых входят атомы двух и более видов, и эти вещества называются сложными. Именно сочетания атомов различных элементов составляют поразительное разнообразие химии. Трудно оценить, сколько существует разных химических веществ — учитывая постоянно синтезируемые новые — и сколь обширно их применение.

**В**ремя от времени в науке случаются открытия, которые противоречат тому, что прежде считалось фундаментальным законом. После такого открытия люди чешут в затылке и пытаются понять, не произошло ли какой ошибки, не вкралась ли неточность в данные. Далее, когда доказательство набирает силу и становится бесспорным, приходится переписывать учебники и в науке возникает совершенно новое направление исследования. Именно так и вышло с открытием в 1962 году Нилом Бартлеттом нового сложного вещества.

Как-то раз в пятницу Бартлетт заработался допоздна и остался у себя в лаборатории один — тут-то и произошло открытие. Он смешал два газа — ксенон и гексафторид платины, и получилось твердое желтое вещество. Что тут удивительного, подумаете вы, однако в те времена научное сообщество считало, что ксенон, как и другие инертные газы (см. с. 10), совершенно не активен химически и не способен образовывать сложные химические вещества. Новое вещество — гексафтороплатинат ксенона, и работа Бартлетта вскоре подтолкнула ученых на получение других сложных веществ на основе инертных

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1791**

Этьенн Франсуа Жоффруа разрабатывает таблицы родства — они показывают, как вещества сочетаются друг с другом

**Начало 1800-х**

Клод Луи Бертолле и Жозеф Луи Пруст спорят о пропорциях, в которых соединяются простые вещества

**1808**

Химическая атомистическая теория Джона Дальтона подтверждает: простые вещества соединяются в строго определенных соотношениях

газов. За следующие несколько десятилетий было обнаружено еще по меньшей мере сто таких веществ. С тех пор эти соединения применяются при лечении опухолей, а также в лазерной хирургии глаза.

## РАЗБИВАЕМСЯ НА ПАРЫ

Вещество Бартлетта, конечно, перевернуло с ног на голову написанное до этого в книгах, однако история этого открытия — не просто красивый пример научного прорыва и опровержения привычной «истины». Это еще и напоминание о том, что в самих простых веществах (особенно неактивных) не очень-то много прока. Ясное дело, применение у них есть — неоновые огни, углеродные нанотрубки и ксеноновая анестезия, к примеру, — однако лишь поиском новых, иногда чрезвычайно сложных сочетаний веществ химикам удается создавать лекарства, которые спасают жизни, и разрабатывать самые передовые материалы.

Чтобы получить полезное в хозяйстве вещество, необходимо объединить несколько веществ — бывает, не одно и не два: так возникают практически все современные продукты, от топлива, тканей и удобрений до красителей, лекарств и моющих средств. Мало что у вас в квартире состоит

## Сложные вещества / молекулы

Хотя существуют и одноатомные молекулы, обычно в молекуле более одного атома. В состав одних молекул входят атомы одного и того же элемента, как в  $O_2$ , а в состав других — разных, как, например, в  $CO_2$ . Но из этих двух веществ сложное —  $CO_2$ , поскольку содержит атомы разных элементов, соединенные химическими связями. Итак, молекулы составляют сложное вещество, но любое ли сложное вещество состоит из молекул? Карты нам путают ионы (см. «Ионы», с. 19). Есть сложные вещества, которые состоят из этих заряженных частиц, а не из молекул. В поваренной соли, к примеру, ионы натрия ( $Na^+$ ) химически связаны с ионами хлора ( $Cl^-$ ) в обширной упорядоченной, повторяющейся кристаллической структуре. Таким образом, независимых отдельных «молекул» хлорида натрия в образце соли, говоря строго, нет. Поэтому химическая формула  $NaCl$  показывает нам лишь соотношение ионов натрия и ионов хлора в веществе, а не описывает его молекулярный состав. С другой стороны, химики вполне могут походя говорить о «молекулах хлорида натрия».

**1833**

Майкл Фарадей [Фэрздей] и Уильям Уэвелл дают определение иону

**1962**

Нил Бартлетт доказывает, что инертные газы могут входить в состав сложных веществ

**2005**

Оценена химическая вселенная 11-атомных молекул, состоящих из C, N, O и F

**Я ПЫТАЛСЯ НАЙТИ ХОТЬ КОГО-НИБУДЬ, С КЕМ МОГ БЫ ПОДЕЛИТЬСЯ СВОИМ ПОРАЗИТЕЛЬНЫМ ОТКРЫТИЕМ, НО ОКАЗАЛОСЬ, ЧТО ВСЕ УШЛИ УЖИНАТЬ!**

Нил Бартлетт (1932–2008),  
англо-американский химик, профессор

не из сложных веществ — если, конечно, как грифель в карандаше, оно не сделано из простого вещества. Даже материалы, которые выросли или сформировались сами собою, например, дерево и вода, — тоже сложные вещества. Более того, они, вообще-то, затайливее многих других.

## СЛОЖНЫЕ ВЕЩЕСТВА И СМЕСИ

Говоря о сложных веществах, необходимо провести одну важную границу. Сложные вещества — химические соединения, в состав которых входят атомы двух или более химических элементов. Однако простым помещением двух — или десяти — простых веществ в одно пространство сложное вещество не получается. Частицам необходимо соединиться — образовать химические связи (см. с. 20). Без химических связей выйдет нечто похожее на светский раут для атомов разных элементов — ученые именуют это смесью. Атомы некоторых элементов объединяются с себе подобными — как, например, кислород воздуха, существующий в основном в виде молекул  $O_2$ . Два атома кислорода образуют молекулу кислорода, но это — не сложное вещество, потому что в этих молекулах содержатся атомы лишь одного химического элемента.

Сложные вещества, таким образом, это соединения, содержащие частицы более чем одного химического элемента. Вода — сложное вещество, потому что в ее состав входят атомы двух химических элементов — водорода и кислорода. Большинство современных материалов и промышленных продуктов — сложные вещества, однако не любое сложное вещество состоит из молекул (см. «Сложные вещества / молекулы», с. 17).

## ПОЛИМЕРЫ

Некоторые химические соединения — вещество в веществе: они состоят из звеньев, повторенных много раз, в результате чего получается своего рода нитка бус. Такие вещества называются полимерами. Некоторые вам хорошо знакомы: полиэтилен, из которого сделаны магазинные пакеты, поливинилхлорид (ПВХ) «виниловых» пластинок, полистирольные контейнеры, в которых продают еду на вынос, — про эти сразу все понятно. Однако есть и менее очевидные полимеры — нейлон и шелк, а также ДНК и белки мышц: все это — полимеры. Повторяющееся звено

во всех полимерах, и природных, и искусственных, называется мономером. Много соединенных между собой мономеров — полимер. Нейлон особенно показателен: в любой школьной лаборатории можно увидеть эксперимент, когда из пробирки вытягивают нейлоновое волокно — хоть на катушку наматывай, как обычную нитку.

### БИОПОЛИМЕРЫ

Биополимеры типа ДНК (см. с. 140) до того сложны, что природе на совершенствование искусства их изготовления потребовались миллионы лет эволюции. Мономеры, то есть «вещества в веществе», этого полимера — нуклеотиды, сами по себе довольно сложные соединения. Связанные между собой, они образуют длинные полимерные цепочки, из которых и состоит шифр ДНК. Чтобы соединить эти мономеры, применяются особые ферменты, и с их помощью к цепочке ДНК можно пристегнуть отдельные дополнительные нуклеотиды. Дух захватывает, стоит только подумать, что природа нашла способ создавать столь сложные вещества прямо у нас в организме.

Так сколько же всего существует веществ? Если по-честному, это никому неизвестно. В 2005 году швейцарские ученые попытались прикинуть, сколько есть устойчивых веществ, содержащих лишь углерод, азот, кислород или фтор. У них вышло около 14 миллиардов, да и то речь лишь о веществах, состоящих не более чем из 11 атомов. «Химическая вселенная», как они ее назвали, — воистину велика.

### Ионы

Когда атом приобретает или теряет отрицательно заряженную частицу — электрон, меняется равновесие зарядов и весь атом в целом делается заряженным. Такой заряженный атом называется ионом. То же бывает и с молекулами, и тогда образуются полиатомные ионы — нитрат-ион ( $\text{NO}_3^-$ ) или же силикат-ион ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ), например. Возникновение связи между разнозаряженными ионами — важный способ образования химических веществ.

## В сухом остатке:

## Химические сочетания

# Как это все крепится

Как устроена поваренная соль? Почему вода кипит при 100 °С? Еще важнее: почему кусок металла подобен общине хиппи? Ответы на эти и многие другие вопросы можно отыскать, уделив внимание крошечным отрицательно заряженным частицам — электронам, что витают вокруг атомов и между ними.

**А**томы крепятся друг к дружке. А если бы было не так? Ну, для начала, во Вселенной воцарился бы страшный кавардак. Без связей и сил, удерживающих материю изнутри, ничто не существовало бы в привычном нам виде. Все атомы, из которых состоят ваше тело, голуби, мухи, телевизоры, кукурузные хлопья, Солнце и Земля, болтались бы себе в практически бескрайнем море атомов. Так что же соединяет атомы?

## ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД

Так или иначе, атомы внутри молекул и веществ соединены между собой электронами — крохотными субатомными частицами, образующими облако отрицательного заряда вокруг положительно заряженного ядра. Электроны упорядочены внутри атома в соответствии со своим уровнем энергии и образуют электронные оболочки вокруг ядра, а поскольку у атомов каждого элемента разное количество электронов, на внешней оболочке атомов оказывается разное число электронов. Электронное облако атома натрия выглядит не так, как у хлора, и у этой разницы есть свои интересные следствия. Скажем больше: это вообще причина их соединения. Натрий легко отдает единственный электрон с внешней оболочки. Потеря одной отрицательно заряженной частицы превращает атом натрия в положительно заряженный ион ( $\text{Na}^+$ ). А вот атом хлора

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1819**

Йенс Якоб Берцелиус выдвигает предположение, что химические связи образуются благодаря электростатическому притяжению

**1873**

Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс выводит уравнение, описывающее межмолекулярные силы в газах и жидкостях

легко присоединяет один электрон и так заполняет свою внешнюю электронную оболочку, превращаясь в отрицательно заряженный ион ( $\text{Cl}^-$ ). Противоположности притягиваются — и извольте: получается химическая связь. И немножко соли — хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ).

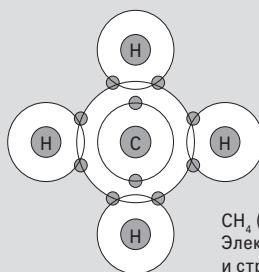
Вдумавшись в Периодическую таблицу, понимаешь, до чего легко электроны добыть и потерять и что именно распределение отрицательного заряда определяет, как атомы вещества крепятся друг к другу. От того, как электрон добыт, отдан или перешел в общее пользование, зависит тип связи между атомами и типы веществ, которые из этих атомов состоят.

## ЖИЗНЕННЫЕ СИТУАЦИИ

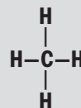
Есть три основных типа химических связей. Начнем с ковалентной, в которой каждая молекула вещества — семейка атомов с несколькими общими электронами. Эти электроны спарены лишь между членами семьи одной молекулы. Представьте себе жизненную ситуацию: каждая молекула, или семья, обитает в симпатичном отдельном домике, держит

## Одинарные, двойные и тройные связи

Если попросту, любая ковалентная связь — общая для двух атомов электронная пара. Электронов, которыми одному атому приходится делиться с другим, обычно столько, сколько их у атома на внешней оболочке. К примеру, поскольку у атома углерода на внешней оболочке четыре электрона, он может образовывать четыре электронные пары с другим атомом — или четыре связи. Способность углерода образовывать четыре связи обуславливает устройство практически всех органических (содержащих углерод) соединений, в которых углеродный скелет оснащен атомами других разновидностей: в длинных органических молекулах-цепочках электроны атомов углерода образуют пары с электронами других таких же атомов, а также часто — с атомами водорода. Однако иногда у двух атомов есть более одной общей электронной пары, то есть получается двойная связь углерод-углерод — или углерод-кислород. Бывают и тройные связи, когда у двух атомов три общие электронные пары, но три электрона на внешней оболочке есть у атомов далеко не всех элементов. У водорода, к примеру, всего один.



$\text{CH}_4$  (метан)  
Электронная конфигурация (слева)  
и структурная формула (справа)



**1912**

Том Мур и Томас Уинмилл формируют понятие о водородной связи, позднее его поддерживает Лайнус Полинг

**1939**

Издана «Природа химической связи» Лайнуса Полинга

**1954**

Полинг получает Нобелевскую премию за исследование химических связей

**2012**

Квантовые химики выдвигают гипотезу о химической связи, возникающей в сильных магнитных полях — вокруг карликовых звезд, например

## Я ТОЛЬКО ЧТО ВЕРНУЛСЯ С КРАТКИХ КАНИКУЛ, КУДА ВЗЯЛ С ПОЛДЕСЯТКА ДЕТЕКТИВОВ И ВАШУ КНИГУ «ХИМИ- ЧЕСКАЯ СВЯЗЬ». ВАША ОКАЗАЛАСЬ САМОЙ УВЛЕКАТЕЛЬНОЙ

Американский ученый Гилберт Льюис,  
из письма Лайнусу Полингу (1939)

в нем свое добро, сама по себе. Так живут молекулы вроде диоксида углерода, воды и аммиака — пахучего вещества, которое самопроизвольно улетучивается из удобрений.

Ионные связи возникают по принципу «противоположности притягиваются», как в случае с хлоридом натрия в приме-

ре с поваренной солью. Такой вид связи подобен жилью в многоквартирнике, где у любого обитателя есть соседи слева и справа, а также сверху и снизу. Тут уже нет отдельных домиков, это одно высотное здание. Свой скарб жильцы в основном держат при себе, однако близкие соседи берут или отдают электрон-другой. Это связывает их между собой — образуются соединения с ионными связями, и атомы не расстанутся друг с другом, потому что существуют как противоположно заряженные ионы (см. «Ионы», с. 19).

А есть еще металлическая связь. Связь в металлах несколько страннее. Возникает она по тому же принципу притяжения противоположных зарядов, но тут у нас не жилая высотка, а, скорее, община хиппи. Все электроны — обобществленные. Эти отрицательные заряды вольно обретаются в металле, и положительно заряженные ионы металла то берут их себе попользоваться, то возвращают в коллективный котел. Поскольку все общее, нет никакого воровства — словно все держатся вместе на чистом доверии.

На одних этих связях Вселенная единой не осталась бы. Помимо сильных связей внутри молекул и веществ есть слабые взаимодействия, которые стягивают воедино целые ансамбли молекул — подобно общественным связям, удерживающим вместе человеческие сообщества. Сильнейшие из таких взаимодействий можно наблюдать в воде.

## ПОЧЕМУ ВОДА — ОСОБЕННАЯ

Вам, вероятно, это и в голову не приходило, однако то, что вода у вас в чайнике закипает при 100 °С, — штука довольно странная. Температура кипения воды куда выше, чем можно было бы ожидать от вещества, состоящего из водорода и кислорода. Поглядев в Периодическую таблицу (см. с. 204–205), можно было бы предположить, что кислороду

естественно вести себя так же, как другим элементам из его столбца. Однако, сотвори вы водородсодержащие вещества с участием атомов элементов, расположенных под кислородом, попросту вскипятить их в чайнике вам не удастся. А все потому, что все три эти вещества кипят при температуре ниже нуля по Цельсию, а это значит, что при температуре, нормальной для вашей кухни, эти вещества — газы. А вода при температуре ниже нуля — все еще твердое вещество, лед. Так почему же соединение, состоящее из кислорода и водорода, остается жидким при столь высоких температурах?

### Ван-дер-Ваальс

Силы Ван-дер-Ваальса, названные в честь голландского физика, — это сравнительно слабые взаимодействия между атомами. Они существуют потому, что даже в химически устойчивых атомах и молекулах электроны все же не замирают на одном месте, и поэтому распределение заряда меняется. Это означает, что отрицательно заряженная часть одной молекулы может временно притянуть положительно заряженную часть другой. Более стойкое разделение заряда возникает в полярных молекулах — в воде, например, и тогда получаются связи посильнее. Водородные связи — особый случай такого притяжения, в котором образуются межмолекулярные контакты значительной силы.

Все дело в силах, удерживающих молекулы воды вместе как единую группу, — они не дают им разлететься во все стороны при малейшем нагреве. Эти так называемые водородные связи образуются между атомами водорода одной молекулы и атомами кислорода другой. Как именно? И здесь тоже все сводится к электронам. В молекуле воды два водородных атома оказываются «в одной постели» с кислородом, который тащит все одеяло — отрицательный заряд, то есть электроны, — на себя. И частично положительно заряженные оголенные атомы водорода тянутся к кислородам-эгоистам из других молекул воды, потому что на них отрицательный заряд. У каждой молекулы воды есть два водорода, и она может образовывать две водородные связи с другими молекулами воды. Те же силы притяжения помогают объяснить решетчатое устройство льда и натяжение на поверхности пруда, благодаря которому по ней носятся водомерки.

## В сухом остатке:

## Делимся электронами



# 06

## От фазы к фазе

Мало что подолгу остается неизменным. Химики говорят о фазовых переходах в материи; если сказать проще — вещества меняются. Материя может принимать множество разных обликов, и помимо привычных твердого, жидкого и газообразного состояний существует немало других, более причудливых состояний материи.

**В**спомните, что происходит с плиткой шоколада, если забыть ее в кармане в жаркий день. Можно выложить ее в прохладном месте, она опять отвердеет, но на вкус будет не совсем такая же, как прежде. Почему? Ответ на этот вопрос дает понимание разницы между исходным состоянием шоколада и тем, во что он превращается, растаяв и затвердев. Но для начала вернемся к школьным урокам природоведения.

### ТВЕРДОЕ, ЖИДКОЕ, ГАЗООБРАЗНОЕ... И ПЛАЗМА

У материи есть три общеизвестных фазовых (агрегатных) состояния: твердое, жидкое и газообразное. Помните, вам про это рассказывали в школе? Простейший пример смены агрегатных состояний вещества — замерзание и плавление воды, то есть переход между твердым и жидким состоянием. Многие другие вещества тоже плавятся, переходя из твердого состояния в жидкое. Разные фазовые состояния часто объясняют плотностью расположения атомов или молекул в веществе. В твердой фазе частицы напиханы плотно, как люди в тесном лифте, в жидкости же молекулы двигаются свободнее. В газе частицы распределены в пространстве еще шире, у их движения нет ограничений — словно двери лифта открылись и пассажиры разбрелись кто куда.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1832**

Первое применение точек плавления для описания органических веществ

**1835**

Адриан-Жан-Пьер Тилорье описывает сухой лед

**1888**

Фридрих Рейнитцер открывает жидкие кристаллы

Обычно эти три состояния материи — предел бытового знания, однако имеется несколько более таинственных и, видимо, менее известных. Во-первых, есть фазовое состояние со слегка футуристическим названием — плазма. Это газоподобное состояние материи применяется в экранах телевизоров, например: электроны отваливаются от своих ядер, и частицы материи приобретают заряд. Разница с газами состоит в том (если продолжить аналогию с лифтом), что двери открываются, а публика двигается прочь не враспынную, а довольно упорядоченно. Поскольку частицы заряжены, они в плазме, скорее, «текут», нежели болтаются как придется. Жидкие кристаллы, применяемые в ЖК-экранах, — еще один пример диковинного агрегатного состояния материи (см. «Жидкие кристаллы», с. 26).

**СТРЕМИТЕЛЬНО ДВИЖЕТСЯ ПО ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СЛОВНО НЕСЕТ ЕГО ПОДОБНАЯ ГАЗУ АТМОСФЕРА, ПОСТОЯННО ЕГО ОКРУЖАЮЩАЯ, ПОКА НЕ ИСЧЕЗНЕТ ОН СОВСЕМ**

Адриен-Жан-Пьер Тилорье  
(1790–1844), французский химик,  
о первом наблюдении за сухим льдом

## БОЛЕЕ ЧЕТЫРЕХ

Четыре агрегатных, или фазовых, состояния вполне описывают многие изменения, которые мы ежедневно наблюдаем в материи. Их довольно даже для некоторых менее рядовых превращений веществ. К примеру, в дым-машинах, используемых в театрах и ночных клубах, способных нагнетать очень плотные клубы дыма или тумана, применяют «сухой лед» — твердый диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ). Если бросить его в горячую воду, он претерпевает необычную метаморфозу — переходит из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое (поэтому его и зовут сухим льдом). Фазовый переход из твердого состояния в газ называется сублимацией (возгонкой). Когда это происходит, все еще не успевший нагреться газ конденсирует пары воды из воздуха и получается туман.

Но все же эти четыре агрегатные состояния не отвечают на вопрос, поставленный в начале этой главы: почему шоколад меняет вкус только потому, что расплавился и потом опять застыл. Он же опять твердое вещество. Дело в том, что фаз существует больше, чем классических четыре. Множество

**1928**

Ирвинг Ленгмюр дает название плазме

**1964**

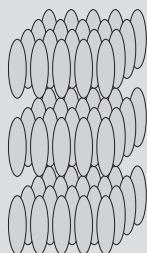
Первые действующие ЖК-мониторы

**2013**

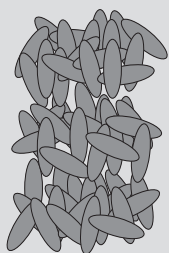
Предсказано существование еще одного фазового состояния воды в планетах-«ледяных гигантах»

## Жидкие кристаллы

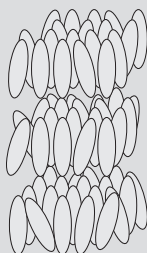
О жидкокристаллическом агрегатном состоянии многие знают благодаря ЖК-мониторам, применяемым в современной электронике. Многие материалы могут находиться в этой фазе — не только те, что есть у вас в телевизоре, хромосомы в клетках вашего тела тоже можно считать жидкими кристаллами. Название подсказывает, что жидкокристаллическое состояние есть нечто среднее между жидкостью и твердым кристаллом. Молекулы, обыкновенно в форме палочек, случайно распределены в одном направлении (как в жидкости), однако упорядочены в другом (как в кристалле). Так происходит потому, что силы, стягивающие молекулы воедино, в одном направлении слабее, чем в другом. Молекулы в жидких кристаллах образуют слои, способные скользить относительно друг друга. Но внутри слоев случайно расположенные молекулы все еще подвижны. Именно это сочетание подвижности и упорядоченности и обуславливает поведение вещества в такой фазе подобно жидкости. В ЖК-мониторах расположение молекул и зазоров между ними влияет на то, как они отражают свет и какой цвет мы воспринимаем. Воздействуя при помощи электричества на положение стиснутых между двумя стеклами молекул в жидком кристалле, можно создавать узоры и образы на экране.



Твердый  
кристалл



Жидкость



Жидкий  
кристалл

веществ имеют гораздо большее разнообразие фазовых состояний даже в твердом виде, и многие из этих твердофазных состояний — кристаллические. Масло какао в шоколаде — на самом деле кристаллическое, и от того, как именно кристаллы образовались, зависит, какое именно у шоколада фазовое состояние.

## ШЕСТЬ ВИДОВ ШОКОЛАДА

Итак, теперь мы готовы разрешить загадку вкуса шоколада. Наверное, вы уже догадались, что шоколад не так прост, как выглядит. Главный ингредиент шоколада — масло какао, оно состоит из триглицеридов, но мы для простоты станем называть их «масло какао». Оно может образовывать не менее шести кристаллических форм — полиморфных модификаций, и все они наделены разной структурой и плавятся при разных температурах. Плавлением и отвердеванием шоколад образует разные полиморфные модификации, у каждой — свой вкус.

Даже если хранить шоколад при комнатной температуре, он постепенно, но неуклонно преобразуется в другую полиморфную разновидность — самую устойчивую. Именно поэтому, развернув шоколадку, которая провалялась несколько месяцев, обнаруживаешь, что у нее какой-то хворый

вид. Белый налет вашему здоровью не повредит. Это просто полиморфная модификация шоколада  $\beta(VI)$ . В некотором смысле все масло какао «хочет» принять форму  $\beta(VI)$  — она устойчивее всех прочих. Но на вкус она так себе. Чтобы замедлить переход шоколада к этому состоянию, можно хранить его при пониженных температурах — в холодильнике, например.

Возможность влиять на состояние шоколада чрезвычайно важна для пищевой промышленности, очевидно, и потому химиками проводились некоторые сложнейшие исследования полиморфизма шоколада. В 1998 году производитель шоколада «Кэдбери», пытаясь вывести тайну вкусного шоколада, даже применил ускоритель элементарных частиц: с помощью этого прибора изготовитель попытался разделить разные формы шоколадного масла и понять, как добиться от лакомства «таяния во рту».

Упоительная на вкус глянцеви́тая разновидность, которая нам всем так нравится, —  $\beta(V)$ , но сделать так, чтобы весь брикет кристаллизовался только в этой модификации, не так-то просто. Для этого требуется пристально следить за плавлением и охлаждением при определенных температурах, и тогда кристаллы сформируются как надо. Но самое главное, конечно, успеть съесть шоколадку прежде, чем она сменит фазовое состояние. Так что, дети, у вас есть отличный довод, чтобы слопать все пасхальные шоколадные яйца еще до наступления Пасхального понедельника!

## Новые фазы

Вещества могут существовать во множестве фаз, есть среди них и такие, которые еще не довелось открыть. Ученые постоянно натываются на неведомые доселе фазовые состояния воды (см. с. 116). В 2013 году в журнале *Physical Review Letters* увидела свет статья, в которой авторы заявили о существовании сверхстабильного «суперионного» льда, который, по прогнозам, обилен в ядрах планет-«ледяных гигантов» — Урана и Нептуна.

## В сухом остатке:

# Не только твердое, жидкое и газообразное

# 07

## Энергия

Энергия — что-то вроде сверхъестественного существа: она могущественна и непостижима. Хотя все мы наблюдаем ее проявления, она никогда не показывает себя в истинном обличье. В XIX веке Джеймс Джоуль заложил основы одного фундаментальнейшего научного закона. Этот закон управляет изменениями энергии, возникающими в химических реакциях.

**И**грай вы в шарады, и выпади вам показать жестами слово «энергия», как бы вы это сделали? Не сразу и придумаешь: энергия — штука трудноуловимая. Это топливо, пища, тепло, нечто, получаемое от солнечных батарей, это свернутая спираль, падающий с дерева лист, надутый парус, магнит, молния и звук испанской гитары. Если энергия — все перечисленное, что же это такое по сути?

### ЧТО ЕСТЬ ЭНЕРГИЯ?

Все живые существа используют энергию для развития и роста тела, а некоторые — и для движения. Люди без нее прямо жить не могут, им подавай ее, да побольше — свет в дома, топливо, чтобы питать нашу технику и производства. И все же энергия — не вещество, ее не потрогаешь и в карман не положишь. Она неосвязаема. Мы всегда более или менее наблюдали ее в действии, но лишь с XIX века знаем, что она в самом деле существует. До работ английского физика Джеймса Прескотта Джоуля [Джоула] энергию мы представляли себе довольно смутно.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1807**

Томас Янг вводит понятие энергии

**1840**

Закон Джоуля объединяет тепло и электрический ток

**1845**

Эксперименты Джоуля с гребным колесом, представление результатов в статье «О механическом эквиваленте тепла»

Джоуль был сыном пивовара, учили его на дому, и многие свои эксперименты он поставил в погребе семейной пивоварни. Его интересовала взаимосвязь тепла и движения — до такой степени, что в свое свадебное путешествие он взял с собой термометры (свой и Уильяма Томсона), чтобы изучать разницу температур на вершине и у основания водопада по соседству. Джоулю с трудом удалось опубликовать свои ранние работы, однако благодаря нескольким знаменитым друзьям, в том числе и пионеру изучения электричества Майклу Фарадею, он все же привлек к своим работам внимание. Суть главного прорыва Джоуля: тепло есть движение.

## Работа

Хотя дать определение энергии не так-то просто, ее можно мыслить себе как способность производить тепло или работу. Да, на первый взгляд это как-то двусмысленно. Производить работу? Какую работу? Работа же на самом деле — важное понятие и в физике, и в химии, и связано оно с движением. Если нечто движется, производится работа. Реакция горения, как в автомобильном двигателе, высвобождает тепло, от которого расширяются газы, и в результате приходят в движение поршни (совершается работа).

Тепло есть движение? На первый взгляд это утверждение лишено смысла. Но задумаемся над ним. Почему вы трете ладони, чтобы согреть их в холодный день? Почему нагреваются покрышки движущегося автомобиля? Статья «О механическом эквиваленте тепла», изданная в первый день нового 1850 года, ставила те же вопросы. В этой работе Джоуль отметил, что море после затяжного шторма теплеет, а также описал в подробностях свои попытки воспроизвести этот эффект при помощи гребного колеса. Точными замерами температуры с применением проверенных термометров он доказал, что движение можно превратить в тепло.

Благодаря исследованиям Джоуля и работам немецких ученых Рудольфа Клаузиуса и Юлиуса Роберта фон Майера мы узнали, что механическая сила, тепло и электричество тесно взаимосвязаны. Джоуль (J или Дж) сделался единицей измерения работы — физической величины, придающей энергии зримость.

**1850**

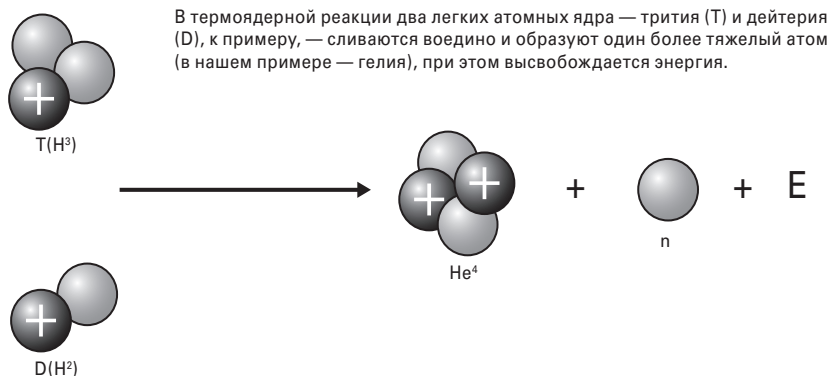
Расширенный вариант «О механическом эквиваленте тепла» издан в «Философских трудах Королевского общества»

**1850**

Рудольф Клаузиус и Уильям Томсон формулируют Первый и Второй законы термодинамики

**1905**

Уравнение  $E = mc^2$  Альберта Эйнштейна связывает энергию ( $E$ ) с массой ( $m$ ) и скоростью света ( $c$ )



### ИЗ ОДНОГО В ДРУГОЕ

Ныне мы умеем распознавать множество разных видов энергии и понимаем, что они могут превращаться друг в друга. Химическая энергия угля или нефти, например, хранится в них до той поры, пока их не сожгут и не превратят эту энергию в тепло, греющее наши дома. Связь, которую Джоуль усмотрел между теплом и движением, уже не кажется нам странной: мы считаем и то и другое разновидностями энергии. Если же взглянуть глубже, тепло есть *на самом деле* движение — кастрюля с горячей водой горяча оттого, что энергичные молекулы воды возбужденно в ней мечутся. Движение — просто вид энергии.

В химических веществах энергия хранится в связях между атомами. Когда в химических реакциях эти связи рвутся, выделяется энергия. Обратный процесс, то есть формирование связей, накапливает энергию про запас. Подобно энергии свернутой пружины такая энергия — потенциальная, она хранится вплоть до времени ее высвобождения. Потенциальная энергия запасена в предметах благодаря их положению в пространстве. Химическая потенциальная энергия обусловлена положением химических связей. Если поставить вас на вершину лестницы, ваша потенциальная энергия будет больше, чем у подножия лестницы; так же и с водопадом, который Джоуль навесил в свой медовый месяц, — потенциальная энергия воды вверху будет больше, чем внизу. Ваша потенциальная энергия зависит от вашей массы: корми вас одними плюшками целый месяц, а потом поставь на вершине лестницы — потенциальной энергии у вас прибавится.

Даже сидеть и лопать мучное — пример энергетических перемен: сахара и жиры плюшек обеспечивают вам химическую энергию, которую ваши клетки преобразуют в тепловую, а она в свою очередь поддерживает температуру вашего тела и позволяет вам двигать мышцами, чтобы вы смогли взобраться по лестнице. Все, что мы делаем, все, на что способно наше тело, и практически все, что вообще происходит, связано с преобразованиями энергии.

### **ЭНЕРГИЯ МЕНЯЕТСЯ, НО ОСТАЕТСЯ ПРЕЖНЕЙ**

Работа Джеймса Джоуля заложила фундамент представления, ставшего одним из важнейших законов всей науки, — закона сохранения энергии; его еще называют Первым законом термодинамики (см. с. 40). Этот закон утверждает, что энергия никогда не создается и не уничтожается. Она лишь преобразуется из одной формы в другую, как показали еще эксперименты Джоуля с гребным колесом. Что бы ни случилось в химических реакциях или где угодно еще, общее количество энергии во Вселенной всегда остается неизменным.

Общее у всех разновидностей энергии одно: она способна что-нибудь менять. Поможет ли это вам придумать, как показать энергию в игре в шарады, — другое дело. Энергия — это вращение гребного колеса. Это плюшка. Это вы взбежали по лестнице, встали наверху и свалились. Изобразите что-нибудь такое. Все так же непонятно, как и раньше.

**МОЕЙ ЦЕЛЬЮ БЫЛО  
СНАЧАЛА ОТКРЫТЬ ТОЧНЫЕ  
ПРАВИЛА, А ЗАТЕМ НАЙТИ ИМ  
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889),  
из книги «Биография Джеймса Джоуля»

**В сухом остатке:**  
**Способность менять**



# 08

## Химические реакции

**Химические реакции — это вам не одни лишь шумные взрывы, от которых сотрясаются лаборатории мультяшных ученых. Это еще и повседневные процессы, тихонько протекающие в клетках живых существ, в том числе — и в наших. Мы даже не замечаем, как они происходят. Но всем же нравятся славные громкие взрывы!**

**О**чень-очень грубо говоря, существуют две разновидности химических реакций. Первые — мощные, зрелищные, взрывные реакции, о которых говорят «отошли бы вы подальше, и очочки защитные наденьте», вторые — неприметные, протекающие втихаря. Те, которые «отошли бы вы подальше», может, и занимательнее, однако неприметные бывают не менее поразительны. (В действительности, конечно, существует головокружительное разнообразие химических реакций, их слишком много, чтобы здесь даже просто перечислить.)

Химики — любители первого вида реакций. Так и мы тоже! Дай кому бесплатный билетик на салют, он разве предпочтет сидеть себе тихо и глядеть, как образуется ржавчина? Кто не подсказывал и не хихикал в кулачок, когда школьный учитель химии поджигал воздушный шарик с водородом и раздавался мощный «бум!»? Попроси любого химика показать его любимую реакцию, и он наверняка выберет самый броский эксперимент, какой сможет провести безопасно. Чтобы понять, как происходят химические реакции, обратимся к учителю химии XIX века и одному из самых зрелищных экспериментов. К сожалению, подобные химические опыты не всегда идут по плану.

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1615**

Первое протоуравнение химической реакции

**1789**

В книге Антуана Лорана Лавуазье «Начальный учебник химии» введено понятие химической реакции

**1803**

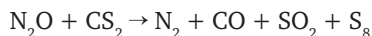
Атомистическая теория Джона Дальтона описывает химические реакции как перестановку атомов

## ОТОШЛИ БЫ ВЫ ПОДАЛЬШЕ

Юстус фон Либих был человеком поразительным. Он пережил голод, стал профессором в 21 год, открыл химические основы роста растений и основал ведущий химический журнал, не говоря уже о нескольких открытиях, приведших к изобретению дрожжевой пасты, ныне известной под маркой «Мармайт». Ему столько всего достойного гордости удалось сделать — однако довелось натворить и кое-что неловкое. Легенда гласит, что в 1853 году Либих показывал реакцию под названием «лающая собака» баварской монаршей семье и реакционная смесь рванула чуточку сильнее задуманного — прямо в лицо королеве-консортнице Терезе Саксен-Гильдбурггаузенской и ее сыну, принцу Луитпольду.

«Лающая собака» и поныне один из самых зрелищных химических экспериментов. Он не только замечательно взрывоопасный и шумный — в ходе реакции раздается громкое «гав!», — он еще и очень красивый. Реакция происходит при смешивании и поджигании сероуглерода ( $\text{CS}_2$ ) с оксидом диазота\* ( $\text{N}_2\text{O}$ ), который более известен под названием «веселящий газ». Это экзотермический процесс, а это значит, что он отдает энергию вовне (см. с. 30). Часть этой энергии в случае реакции «лающая собака» выделяется в виде мощной голубой вспышки света. Обычно процесс проводят в большой прозрачной трубе, и выглядит это так, будто включили и выключили световой меч. Уделите минутку и добудьте в интернете видеозапись этого эксперимента, он того стоит.

Если бы этот эффект не произвел столь сильного впечатления на зрителей, они бы не просили Либиха повторить его, и королева Тереза не получила бы мелких травм — по словам Либиха, ее ранило до крови. Впрочем, как и все без исключения реакции, «лающая собака» — всего лишь перестановка атомов. В этой конкретной реакции задействовано всего четыре вида атомов — углерод (C), сера (S), азот (N) и кислород (O).\*\*



**«...ПОСЛЕ ЭТОГО ЖУТКОГО  
ВЗРЫВА Я ОГЛЯДЕЛ ЗАЛУ...  
И УВИДЕЛ, КАК ПО ЛИЦАМ  
КОРОЛЕВЫ ТЕРЕЗЫ И ПРИНЦА  
ЛУИТПОЛЬДА ТЕЧЕТ КРОВЬ»**

Юстус фон Либих (1803–1873)

\* Привычное, но устаревшее название — закись азота.

\*\* Реакция «лающая собака»: в похожей параллельной реакции может образовываться  $\text{CO}_2$ ; приведена схема реакции без уравнивающих коэффициентов.

**1853**

В ходе показа знаменитой «лающей собаки» ранена баварская королева

**1898**

Применено понятие фотосинтеза

**1908**

Фриц Габер [Хабер] запускает пробное производство аммиака из азота и водорода

**2013**

Для наблюдения за реакциями в режиме реального времени применена атомно-силовая микроскопия

## Химические уравнения

В 1615 году Жан Беган опубликовал сборник заметок к лекциям по химии, в которых разместил чертеж реакции *возогнанной ртути* (хлорида ртути,  $\text{HgCl}_2$ ) с антимонитом (сульфидом сурьмы (III),  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ). Эта диаграмма больше похожа на логическую схему, однако ее считают первой записью химической реакции. Позднее, в XVIII веке, Уильям Каллен и Джозеф Блэк, читавшие лекции в университетах Глазго и Эдинбурга, объясняя студентам химические реакции, ввели в оборот схемы со стрелочками.

Чтобы показать, что получается в ходе реакции, химики применяют химические уравнения.

## ЕДВА ЗАМЕТНО

А что же с реакциями потише, по-невзрачнее? Постепенное ржавление железного гвоздя — химическая реакция между железом, водой и кислородом воздуха, в результате которой получаются продукты окисления железа — рыже-бурые хлопья ржавчины (см. с. 52). Это медленное кислородное окисление. Надрежьте яблоко, и оно побуреет — это тоже реакция окисления, протекает всего за несколько минут.

Одну из важнейших неприметных реакций можно наблюдать в цветочном горшке у вас на подоконнике. Комнатные растения поглощают солнечные лучи и используют полученную энергию в преобразовании диоксида углерода и воды в сахара и кислород — реакции фотосинтеза, как всем нам известно (см. с. 148). Это очень краткий пересказ гораздо более сложных последовательных процессов, эволюционировавших в растениях. Сахара — топливо жизни растений, а побочный продукт кислород выделяется вовне. Реакции эти, может, и не такие театральные, как «лающая собака», однако они необходимы всей нашей планете для жизни.

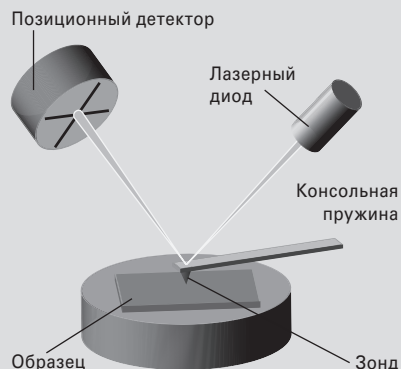
Химические реакции можно поискать в собственном организме. Ваши клетки, по сути, емкости с реагентами, миниатюрные химические лаборатории. В каждой клетке протекают процессы, обратные тем, что свойственны растениям: для высвобождения энергии сахар, растворенный в крови, окисляется кислородом вдыхаемого воздуха, а в результате получаются углекислый газ и вода. Эти реакции дыхания, противоположные дыхательным процессам у растений, — еще один важный для жизни на Земле процесс.

## ПЕРЕСТАНОВКА

Мощные они или неприметные, медленные или мгновенные, все реакции суть результат тех или иных изменений в расстановке атомов реагентов. Атомы различных элементов можно растащить в разные стороны

## Смотрим, как протекают реакции

Обычно, говоря «наблюдаем реакцию», мы имеем в виду взрыв, изменение цвета или еще какое-нибудь следствие химического процесса. Мы не видим отдельных молекул и потому не можем знать, что именно происходит. Но в 2013 году американские и испанские ученые воочию увидели, как протекает химическая реакция. Они применили атомно-силовой микроскоп и с близкого расстояния сняли, как на серебряной поверхности реагируют отдельные молекулы олиго-(фенилен-1,2-этинилена) и образуются новые циклосодержащие продукты. В атомно-силовой микроскопии получаемые картинки совершенно не похожи на привычные нам фотографии. Такой микроскоп оборудован тончайшим зондом, который при соприкосновении с объектом на поверхности генерирует сигнал. Он способен почувствовать даже отдельный атом. На снимках, сделанных в 2013 году, совершенно отчетливо видны связи и атомы и реагентов, и продуктов.



и составить обратно в другом порядке. Обычно получаются новые вещества — между атомами веществ в реакционной среде устанавливаются новые связи. В реакции «лающая собака» оксид углерода и диоксид серы — новые вещества, образующиеся в ходе реакции. Кроме того, получаются еще молекулы азота и серы. В фотосинтезе создаются молекулы куда больших размеров — длинные цепочки сахаров, в состав которых входит множество атомов углерода, водорода и кислорода.

## В сухом остатке:

## Перестановка атомов

Некоторые реакции протекают лишь в одном направлении, а другие — и туда и сюда, беспрестанно. В таких «гибких» реакциях есть равновесие. Равновесные реакции происходят повсюду — у вас в крови и в топливных системах, благодаря которым космонавты «Аполлона-11» вернулись на Землю.

**К** вам в гости должны прийти несколько друзей, и вы купили пару бутылок красного вина. Вам не терпится начать посиделки, вы открываете первую бутылку, разливаете вино по бокалам и ждете, когда все соберутся. Через час, после шквала виноватых СМС, вы с одним доехавшим другом все еще потягиваете первую порцию, а остальные бокалы стоят нетронутые. Дальше случится одно из двух. Либо ваш друг придумает какую-нибудь вежливую отговорку и уедет, а вам останется сливать вино из ничьих бокалов обратно в бутылку, либо вы вдвоем прикончите свое, а следом и остальные, а затем откупорите вторую бутылку и продолжите наливать.

### ЛИШЬ БЫ ВИНО ЛИЛОСЬ

Вы, возможно, недоумеваете, при чем здесь химия. Многие реакции в химии похожи на историю с неудачными винными посиделками. Так же, как процесс переливания вина из бутылки в стакан и обратно, эти реакции обратимы. В химии это называется равновесием, и от него зависит, в каком соотношении в реакционной смеси присутствуют реагенты и продукты реакции.

Вообразите, что вино в бутылке — это химические реагенты, а вино, разлитое по бокалам, — продукты реакции. Посиделки организовали вы, в ваших руках управление потоком вина, и, если кто-то допил свое,

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1000**

Начало формирования  
Великого сталактита  
(пещера Дулин, Ирландия)

**1884**

Принцип Ле Шателье

**1947**

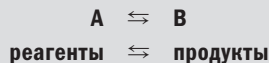
Пол Самуэльсон  
[Сэмюэлсон] применяет  
принцип Ле Шателье  
к экономике

вы ему подливаете. Так же и с равновесием в реакции: оно контролирует поток превращения реагентов в продукты, и, если какой-то продукт исчезает из реакционной смеси, равновесие восстанавливается путем превращения еще какого-то количества реагентов в продукты. Но обратимая реакция протекает и в противоположном направлении, и потому, если что-то вмешивается в положение дел и в смеси вдруг накапливается слишком много продукта, равновесие толкает реакцию в обратном направлении и обращает продукты в реагенты — сливает вино из бокалов в бутылку.

Существование равновесия не означает, что обе стороны уравнения равны между собой — вина, разлитого по бокалам, и вина в бутылке может быть разное количество. У каждой химической системы есть свое состояние золотой середины, когда прямая и обратная реакции происходят с одинаковой скоростью. Это применимо не только к сложным процессам, но и к простейшим системам вроде слабых кислот (см. с. 45), отдающих и принимающих ионы водорода ( $H^+$ ), и даже к воде, распадающейся на ионы  $H^+$  и  $OH^-$ . В воде равновесие расположено ближе к  $H_2O$ , а не к отдельным ионам, и потому, что бы ни происходило, равновесие будет стремиться сохранить большинство частиц в системе в виде молекул  $H_2O$ .

## Константа равновесия

У всякой химической реакции есть своя точка равновесия, но как нам узнать, где она? Величина под названием «константа равновесия» определяет, какая часть реагентов превращается в продукты в обратимой реакции — она-то и говорит нам, где оно, это равновесие. Константа равновесия обозначается буквой  $K$ , а ее значение равно отношению количеств продуктов реакции и реагентов. Если количества (или концентрации) продуктов и реагентов равны,  $K = 1$ . Однако, если продуктов больше, чем реагентов,  $K$  превосходит единицу, а если меньше —  $K$  меньше единицы. У любой реакции свое значение  $K$ . В производстве промышленных реактивов для изменения скоростей реакций применяют катализаторы, вынуждая реакцию выдавать больше продукта. Реакции, проводимые ради получения ценных веществ, — аммиака, например (см. с. 68), необходимо постоянно сдвигать в сторону продукта, извлекая его из реакционной смеси по мере получения. Изымая продукт, мы меняем соотношение реагентов и продуктов, и реакция смещается в сторону получения продукта, чтобы компенсировать его недостаток.



$$K = [B] / [A]$$

(квадратные скобки = концентрация)

\* В русскоязычной литературе часто встречается  $K_{\text{равн}}$ .

**1952**

Обнаружен Великий  
сталактит

**1969**

Тetraоксид диазота забрасывает экипаж  
«Аполлона-11» обратно на Землю

## РАКЕТНОЕ ТОПЛИВО

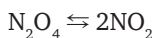
Где еще встречается химическое равновесие? Высадка на Луну в 1969 году — хороший пример. Разработанная НАСА система, позволившая Нилу Армстронгу, Баззу Олдрину и Майклу Коллинзу вернуться домой, — химическая.

## ВО ВСЕМ СУЩЕСТВУЕТ СЕРЕДИНА, ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ РАВНОВЕСИЕМ

Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907),  
русский химик, физик, метролог,  
экономист, технолог, геолог,  
метеоролог, педагог, приборостроитель

Чтобы возник толчок, который закинет их обратно в космос, нужны были топливо и окислитель — то, что заставляет топливо гореть активнее при добавлении к горючему кислорода. Окислитель, примененный в полете «Аполлона-11», — тетраоксид диазота ( $N_2O_4$ ), его молекулы расщепляются пополам и образуют молекулы

диоксида азота ( $NO_2$ ). Однако  $NO_2$  можно легко превратить обратно в  $N_2O_4$ . Химики записывают это так:



Если поместить тетраоксид диазота в стеклянную банку (не советую: он едкий, и, если обольетесь, слезет кожа), можно увидеть это равновесие в действии. Пока содержимое хранится в холоде, буроватый тетраоксид диазота\* плещется себе на дне банки, а молекулы диоксида азота витают над ним облаком. Однако, если температура и другие условия меняются, смещается и равновесие. В случае с тетраоксидом диазота легкое нагревание сдвигает равновесие вправо, и все больше окислителя превращается в газ. Охлаждение превращает газ обратно в жидкость —  $N_2O_4$ .

\* Сам по себе тетраоксид азота бесцветный, а бурый оттенок ему придает примесь растворенного в нем  $NO_2$

## ПРИРОДНОЕ РАВНОВЕСИЕ

Равновесия в природе встречаются сплошь и рядом. Благодаря им химический состав нашей крови остается неизменным, с показателем pH около 7, и кровь поэтому никогда не делается слишком кислой. Связаны с этим же равновесием и обратимые реакции, благодаря которым углекислый газ доставляется в легкие, чтобы вы его выдохнули наружу.

Если вам доводилось смотреть на сталактиты и сталагмиты в карстовых пещерах, вы, вероятно, задумывались, как они образуются. Великий сталактит, свисающий со сводов пещеры Дулин на западном берегу Ирландии, — один из крупнейших в мире, в нем семь метров в длину.

Он прирастал более тысячи лет. Это природное чудо на самом деле лишь пример химического равновесия:



$\text{CaCO}_3$  — химическая формула карбоната кальция, из которого состоят известняки. Дождевая вода, в которой растворен углекислый газ, производит слабую кислоту — угольную ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ); она вступает в реакцию с карбонатом кальция в известняке — растворяет его, и получаются ионы кальция и гидрокарбоната. Дождь, проникая через поры и щели в породе, растворяет известняк и тащит раствор с ионами в нем за собой. Так постепенно возникают громадные карстовые пещеры. Стактиты, подобные тем, из пещеры Дулина, образуются там, где водный раствор с ионами кальция и гидрокарбоната долго капает в одном и том же месте. Дождевая вода капает, и в ней тем временем происходит обратная реакция: ионы превращаются обратно в карбонат кальция, воду и диоксид углерода, в результате образуется известняк. Постепенно прирастая, возникает известняковое изваяние капавшей воды — поразительное зрелище.

## Принцип Ле Шателье

В 1884 году Анри Луи Ле Шателье сформулировал главный принцип химического равновесия: «Если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-либо из условий равновесия, то в системе усиливаются процессы, направленные на компенсацию внешнего воздействия». Иными словами, когда хоть какой-нибудь фактор, влияющий на равновесие, меняется, химическая система отыскивает новую точку равновесия, чтобы это изменение минимизировать.

**В сухом остатке:**  
**Статус-кво**



# 10

## Термодинамика

**Термодинамика для химиков — способ предсказывать будущее. Опираясь на несколько фундаментальных законов, они могут прогнозировать, пойдет та или иная реакция или нет. Если у вас не получается сразу увлечься термодинамикой, учтите: она много чего может сообщить вам о чае и конце Вселенной.**

**Т**ермодинамика, может, и смахивает на какой-то замшелый учебный предмет, который в наши дни никому не нужен. Он же основан на законах, сформулированных сто с лишним лет назад. Чему термодинамика может научить нас нынче? Так вот — много чему, вообще-то. Химики применяют термодинамику, чтобы разобраться, что происходит с живыми клетками, когда им холодно, — к примеру, когда человеческие органы обложены льдом вплоть до времени трансплантации. Термодинамика помогает химикам предсказывать поведение «жидких солей», применяемых в качестве наполнителей в аккумуляторах холода, в лекарствах и ультрасовременных материалах.

### НИ СОЗДАТЬ, НИ РАЗРУШИТЬ

Мы уже познакомились с Первым законом термодинамики (см. с. 31). В простейшем виде он утверждает, что энергию невозможно ни создать, ни разрушить. В этом много смысла, если вспомнить, что мы знаем о превращениях энергии: энергию можно преобразовывать из одного ее вида в другой — к примеру, химическая энергия в бензобаке вашего автомобиля преобразуется в кинетическую энергию движения, стоит вам повернуть ключ в замке зажигания. Именно превращениями энергии люди, изучающие термодинамику, и интересуются.

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1842**

Юлиус Роберт Майер формулирует закон сохранения энергии

**1843**

Джеймс Прескотт Джоуль тоже формулирует закон сохранения энергии

**1847**

Герман Людвиг фон Гельмгольц еще разок формулирует закон сохранения энергии

**1850**

Рудольф Клаузиус и Уильям Томсон формулируют Первый и Второй законы термодинамики

Химики говорят, что энергия в некоторых химических реакциях «теряется», но на самом деле этого, конечно, не происходит. Она просто уходит куда-то — обычно в окружающую среду в виде тепла. В термодинамике такие реакции, протекающие с «потерей тепла», называются экзотермическими. Обратный случай, когда тепло из окружающей среды поглощается, — эндотермические реакции.

Важно помнить, что, независимо от того, сколько энергии перемещено между материалами, участвующими в реакции, и их окружением, общее количество энергии остается неизменным. Иначе не работал бы закон сохранения энергии — Первый закон термодинамики.

## ВТОРОЙ ЗАКОН УНИЧТОЖАЕТ ВСЕЛЕННУЮ

Второй закон термодинамики усвоить несколько труднее, однако с его помощью можно объяснить практически все. Его применили к объяснению Большого взрыва и для предсказания конца Вселенной, а также, вместе с Первым, Второй закон объясняет нам, почему попытки построить вечный двигатель обречены на провал. А еще он помогает нам понять, почему чай остывает, а не нагревается.

Закавыка Второго закона состоит в том, что он опирается на мудреное понятие, именуемое энтропией. Энтропию часто называют мерой беспорядка: чем менее нечто упорядочено, тем выше в нем энтропия. Вообразите пакетик соленых крендельков. Пока все крендельки

## Система и окружающая среда

Химикам нравится, чтобы во всем был порядок, и потому, берясь за термодинамические расчеты, они всегда следят за точностью определения предмета вычислений. Перво-наперво нужно определить систему или реакцию, о которой идет речь, а все остальное тогда — окружающая среда. Вот остывает, к примеру, чай в чашке: у нас есть чай и есть все остальное вокруг — чашка, блюдце, воздух, в который поднимается пар от чая, ладонь, которая горячей чашкой греется. Когда речь заходит о химических реакциях, определить, где пролегают границы между системой и окружающей средой, бывает несколько сложнее.

Полная термодинамическая система



1877

Людвиг Больцман описывает энтропию как меру беспорядка

1912

Вальтер Нернст постулирует Третий закон термодинамики

1949

Уильям Фрэнсис Джиок получает Нобелевскую премию за разработки в области химической термодинамики

1964

«Флэндерз и Суонн» выступают с песней «Первый и Второй закон»

лежат в пакете, энтропия их невысока. Но стоит слишком порывисто вскрыть пакетик, крендельки полетят во все стороны, и энтропия у них как у совокупности изрядно повысится. То же верно и когда вы откупориваете склянку с нашатырным спиртом — в этом случае приращение беспорядка вы учуете носом.

Второй закон термодинамики утверждает, что энтропия всегда увеличивается — или, по крайней мере, никогда не уменьшается. Иными словами, все в природе стремится разупорядочиться. Это применимо ко всему, включая саму Вселенную, в которой рано или поздно водворится полный беспорядок и тлен. Довод в пользу этого жутковатого прогноза состоит в том, что, по сути, способов разбросать где попало крендельки

гораздо больше, чем способов сложить их в пакетик (см. «Энтропия», с. 43). Второй закон иногда формулируют в понятиях тепла, и тогда говорится, что тепло всегда перемещается от более нагретого места системы к менее нагретому, — именно поэтому чай всегда остывает, отдавая тепло окружающей среде, а сам делается холодным.

## НЕ ЗНАТЬ ВТОРОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ — ВСЕ РАВНО ЧТО НЕ ПРОЧЕСТЬ НИ ЕДИНОГО СОЧИНЕНИЯ ШЕКСПИРА

Чарлз Перси Сноу (1905–1980),  
английский писатель, физик,  
политический деятель

С точки зрения химика, однако, Второй закон важен для определения того, что происходит в химических процессах. Реакция лишь тогда термодинамически осуществима — или, иными словами, она пойдет в определенном направлении, — если общая энтропия увеличивается. Чтобы определиться с этим, химику необходимо думать об изменении энтропии не только в «системе», которая зачастую оказывается гораздо более сложно устроенной, чем кулек с крендельками или чашка чая, но также и в окружающей среде (см. «Система и окружающая среда», с. 41). Если не нарушается Второй закон, реакция пойдет, а если она буксует, химику предстоит понять, что нужно исправить, чтобы химический процесс сдвинулся с мертвой точки.

\* Корректнее говорить, что нулю равно не абсолютное значение энтропии, а ее изменение для любого процесса, протекающего при абсолютном нуле.

## НАМ НЕ СТРАШЕН ТРЕТИЙ ЗАКОН

Третий закон термодинамики менее известен, нежели два первых. По сути, он гласит: когда температура идеального кристалла — да, идеального — достигает абсолютного нуля, энтропия в нем равна нулю\*.

## Энтропия

Энтропия — на самом деле мера того, в скольких различных вариантах та или иная система может существовать в заданных условиях. Нам, положим, известен размер кулька с крендельками, и мы даже знаем, сколько там этих крендельков. Однако, если потрясти упаковку, невозможно предугадать, как разместится в ней каждый кренделек, когда мы кулек откроем. Энтропия показывает, сколько существует способов расположения крендельков внутри упаковки. Чем больше пакет, тем больше вариантов размещения в нем крендельков. В химических реакциях, где предмет рассмотрения — молекулы, а не крендельки, приходится учитывать гораздо больше всяких параметров — например, температуру и давление.

Что объясняет, почему о Третьем законе часто забывают. Абстрактный он какой-то — и полезен только людям, которые знают, как остудить что-либо до абсолютного нуля ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), и работают с кристаллами — да не с какими попало, а с совершенными, идеальными!

**В сухом остатке:**  
**Перемены в энергии**

# Кислоты

**Как так получается: уксус можно хранить в стеклянной бутылке, sprыскивать им картофельные чипсы и есть их, а фторсурьмяная кислота съедает саму бутылку? Все дело в одном маленьком ионе, который есть в каждой кислоте — от соляной у вас в желудке до сильнейших на свете сверхкислот.**

**Г**емфри Дэви [Хамфри Дейви] начинал неприметным помощником аптекаря, а прославился тем, что предлагал добропорядочным людям вдыхать веселящий газ. Родился он в Пензансе, Корнуолл, в душе был человеком книжным и дружил с лучшими поэтами-романтиками Англии — Робертом Саути и Сэмюэлом Тейлором Колриджем, — но карьере сделал все же в химии. Он поступил на службу химиком в Бристол, где опубликовал работу, обеспечившую ему преподавательскую должность, а позднее — и место профессора химии в Королевской ассоциации в Лондоне.

На карикатурах XIX века Дэви развлекает публику на лекциях при помощи мехов с оксидом диазота — веселящим газом, хотя на самом деле он предлагал применять этот лечебный газ как анестетик. В свободное от лекций время Дэви занимался передовыми исследованиями в электрохимии (см. с. 92). Не он первым понял, что электричеством можно разделять вещество на составляющие его ионы, но он все же с пользой применил разработанные им методы — открыл калий и натрий. А еще он проверил теорию, выдвинутую одним из величайших людей в химии — Антуаном Лавуазье.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1778**

Кислородная теория кислот  
Антуана Лорана Лавуазье

**1810**

Гемфри Дэви опровергает кислородную теорию

**1838**

Водородная теория кислот  
Юстуса фон Либиха

Лавуазье принял смерть (от гильотины Французской революции) за несколько лет до этого. И хотя помнят его за многочисленные прозрения — в том числе за предположение, что вода состоит из кислорода и водорода, — по крайней мере в одном он ошибался. Лавуазье считал, что кислород, элемент, который сам же и назвал *oxugen* («порождающий кислоты»), сообщает кислотам их кислотность. Но Дэви опроверг это утверждение. Применяв электролиз, он разъял соляную кислоту на составляющие и выяснил, что в ее состав входят лишь водород и хлор. В этой кислоте нет кислорода. Соляная кислота найдется на полке в любой химической лаборатории, и именно эта (хлороводородная) кислота помогает нам усваивать съеденное.

## Моль

У химиков занятное представление о количествах. Они частенько не взвешивают что-то, а хотят знать, сколько именно частиц в том или ином образце вещества. Определенное количество частиц, равное числу атомов в 12 граммах обычного угля, они именуют молей. И поэтому, если на бутылке с кислотой написано 1М (одномолярная), это значит, что в этой бутылке содержится  $6,02 \times 10^{23}$  частиц кислоты на литр. К счастью, пересчитывать частицы вручную не приходится. У веществ есть «молярная масса» — масса одного моля этого вещества.

## ВОДОРОД, А НЕ КИСЛОРОД

В 1810 году Дэви пришел к выводу, что кислород определяющим кислотные свойства вещества быть не может. На создание первой по-настоящему современной теории кислот потребовалось почти сто лет, и выдвинул ее шведский химик Сванте Аррениус, за что позднее получил Нобелевскую премию. Аррениус предположил, что кислоты — это вещества, которые при растворении в воде выделяют водород в виде положительно заряженного иона ( $H^+$ ). А еще он утверждал, что щелочные вещества (см. «Основания», с. 46) при растворении в воде выделяют гидроксильные ионы ( $OH^-$ ). Хотя Аррениусово определение оснований позднее пересмотрели, главное положение его теории — кислоты как доноры ионов водорода — по-прежнему есть фундамент нашего понимания кислот.

## АКУЛОЙ Я БРОШУСЬ В ХИМИЮ

Сэмюэл Тейлор Колридж (1772–1834), английский поэт, друг Гемфри Дэви (1778–1829)

## 1903

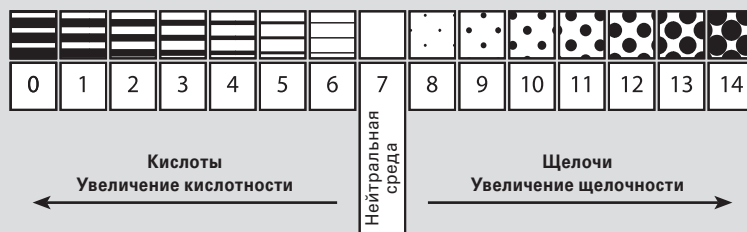
Сванте Аррениус получает Нобелевскую премию за работы в химии кислот

## 1923

Йоханнес-Николаус Брэнстед и Томас Лоури независимо друг от друга выдвигают протонную теорию кислот; определение кислоты Гилберта Льюиса

## Основания

По pH-шкале основаниями считаются вещества, у водных растворов которых pH выше 7, а pH = 7 — срединная точка шкалы от 0 до 14 (хотя существуют среды, в которых pH отрицательный или превышает 14). Хорошо растворимые в воде основания называются щелочами. Вещества со щелочными свойствами включают в себя аммиак и кухонную соду. Проведенное шведскими учеными в 2009 году исследование показало, что вещества с щелочными свойствами, так же, как и фруктовые соки (с кислотными), могут вредить здоровью зубов. Отчего обычай чистить зубы содой — чтобы нейтрализовать кислоты — видится несколько устаревшим. Поскольку pH-шкала — логарифмическая, увеличение всего на единицу означает, что вещество в десять раз щелочнее, и наоборот. То есть вещества с pH = 14 в десять раз щелочнее, чем вещества с pH = 13, а кислоты с pH = 1 в десять раз кислотнее тех, у которых pH = 2.



## СЛАБЫЕ И СИЛЬНЫЕ КИСЛОТЫ

Ныне кислоты определяются как доноры, а основания — как акцепторы протонов. (Вспомним, что в этом контексте «протон» — это водородный атом, у которого отняли единственный электрон, и получился ион, то есть кислоты отдают ионы водорода, а основания — принимают.) Сила кислоты — мера легкости, с которой она отдает протон. Уксусная, или этановая, кислота ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), которой вы sprыскиваете картошку, — кислота довольно слабая, поскольку в любой момент времени довольно много молекул в ее растворе находятся в нерасщепленном состоянии. Протоны непрерывно отваливаются и присоединяются обратно, и так образуется равновесная смесь (см. с. 36).

Соляная кислота Дэви ( $\text{HCl}$ ), напротив, протоны отдает охотно. Вся хлороводородная кислота, растворенная в воде, превращается в ионы водорода ( $\text{H}^+$ ) и хлора ( $\text{Cl}^-$ ), иными словами — полностью ионизируется.

Сила кислоты — не то же самое, что ее концентрация. Если взять одно и то же число молекул кислоты и растворить в одном и том же объеме воды, сильная кислота вроде соляной распадется на ионы сильнее, чем слабая кислота, и поэтому концентрация ионов водорода в растворе сильной кислоты выше. Однако можно разбавить соляную кислоту большим количеством воды, и тогда она станет слабее уксусной. Химики измеряют концентрацию кислот по шкале pH. Хоть оно и путает, но все-таки: чем ниже pH, тем выше концентрация ионов водорода, — чем концентрированнее кислота, тем ниже у нее pH и тем она кислее.

## СВЕРХКИСЛОТЫ

Общеизвестное замечательное свойство кислот: ими можно растворять что угодно — хоть стол, хоть овощ, хоть, как популярно показали нам в сериале «Во все тяжкие», целое тело в ванне. Вообще-то, плавиковая (фтороводородная) кислота пол в ванной эдак запросто не разъест и целое тело в кашу мгновенно не растворит, как нам рассказывают в телевизоре, но, конечно, ожог, если облиться ею, останется.

Хотите по-настоящему зверскую кислоту — берите плавиковую и смешайте с пентафторидом сурьмы. Получится фторсурьмяная кислота, и вот она такая кислая, что вываливается за край шкалы pH. До того она едкая, что хранить ее приходится в тефлоне — материале нерушимой стойкости благодаря едва ли не крепчайшим в химии связям углерод-фтор. Такое вещество называется сверхкислотой (или суперкислотой).

Некоторые сверхкислоты способны разъедать стекло. Как ни странно, карборановые сверхкислоты, одни из самых сильных, можно хранить в обычной стеклянной бутылке. Все потому, что коррозионные свойства кислоты определяют не ионы водорода, то есть не кислотность по Аррениусу, а другие частицы. Плавиковая кислота разъедает стекло содержащимися в ней ионами фтора. В карборановых кислотах, которые сильнее плавиковой, отрицательно заряженные ионы не имеют коррозионного действия.

**В сухом остатке:**  
**Свободу водороду**



# 12

## Катализаторы

Некоторые реакции никак не идут без посторонней помощи. Их нужно подталкивать. Некоторые простые и сложные вещества могут оказывать такую помощь — они называются катализаторами. В промышленности катализаторы зачастую — металлы, их применяют для ускорения реакций. В наших телах тоже задействованы крошечные количества металлов, содержащихся в молекулах, именуемых ферментами, — эти молекулы ускоряют биологические процессы.

**В** феврале 2011 года врачи больницы Принца Чарлза в Брисбене приняли 73-летнюю даму с артритом, которая жаловалась на головокружение, рвоту, головные боли, подавленность и анорексию. Ни один из этих симптомов под ее основной диагноз не подходил и не проистекал из перенесенной ею за пять лет до этого операции по замене бедренного сустава. Сделав кое-какие анализы, врачи увидели, что у дамы в организме повышена концентрация кобальта. Оказалось, что металлическое сочленение у нее в новом бедре отдает в кровь кобальт, и из-за этого у старушки неврологические симптомы. Кобальт — металл ядовитый. От него при контакте с кожей возникает раздражение, а если вдохнуть кобальтовую пыль — затруднение дыхания. В больших дозах от него могут произойти самые разные неприятности. И все же он нужен нам для жизни. Как и другие переходные металлы (см. с. 8) вроде меди или цинка, он необходим для действия ферментов. Ключевая роль кобальта — в витамине  $B_{12}$ , который есть в мясе и рыбе, им также подкармливают зерновые. По сути, кобальт действует как катализатор.

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1912**

Поль Сабатье получает Нобелевскую премию по химии за разработки в области катализа металлами

**1964**

Дороти Ходжкин получает Нобелевскую премию за первое установление структуры металлофермента

## ПОМОГАЕТ

Что такое «катализатор»? Вы, возможно, слышали про каталитические конвертеры в автомобилях (см. «Фотокатализ», с. 51) или речевой оборот «катализировать нововведение»? У вас есть некое смутное понимание, что это означает «начать что-то». Но чтобы понять, как действует катализатор или фермент (см. с. 132), представьте себе частицу-помощник. Допустим, вам нужно покрасить потолок, но слишком оно трудозатратно, и тогда вы злоупотребите хорошим к вам отношением и сноровкой любимого человека или соседа по квартире, чтобы кто-то все-таки начал этот процесс. Вы отправляете их купить нужную краску и валик, а сами пока собираетесь с духом. Кажется, что все как-то проще, если кто-нибудь вам помогает.

### Каталитические конвертеры

Каталитический конвертер в автомобиле — такая штука, благодаря которой из выхлопа удаляют наиболее вредные составляющие. Ну или, по крайней мере, превращают их в менее вредные. В каталитических конвертерах применяется в основном родий, которого в природе еще меньше, чем золота. Он помогает превратить оксиды азота в азот и воду. Палладий помогает превратить оксид

углерода (угарный газ) в диоксид углерода. Да, диоксид углерода при этом, конечно, выделяется, но зато хоть не угарный газ, он для людей гораздо вреднее. В каталитическом конвертере реагенты — газы, а родий — в другой фазе, твердый. Такого рода катализаторы называются гетерогенными. Когда катализатор в той же фазе, что и реагенты, его называют гомогенным.

**1975**

Первые каталитические конвертеры в автомобилях

**1990**

Ричард Шрок разрабатывает эффективный металлический катализатор для реакций метатезиса

**2001**

«Пилкингтон» представляет первое стекло, самоочищающееся за счет процессов фотокатализа

Нечто подобное происходит в некоторых химических реакциях. Ну никак они не начинаются без посторонней помощи — так же, как вы не можете начать красить без вмешательства соседа по квартире, — а благодаря участию катализатора задача кажется не такой уж непосильной. На самом же деле катализатор и впрямь уменьшает количество энергии, необходимое для того, чтобы реакция началась, — из-за него реакция идет другим путем, на этом пути энергетический барьер ниже, и реагенты способны его преодолеть. Что дополнительно приятно, катализатор в реакции не расходуется, и к его помощи можно прибегать вновь и вновь.

### САМАЯ МАЛОСТЬ

В живом организме переходные металлы часто включены в состав витаминов из-за своих каталитических свойств.  $V_{12}$  долгое время оставался загадкой — в организм он поступал, если употреблять в пищу печень:

**НИКЕЛЬ, КАЗАЛОСЬ... ОБЛАДАЕТ ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫМ СВОЙСТВОМ ГИДРОГЕНИЗИРОВАТЬ ЭТИЛЕН, А САМ ПРИ ЭТОМ, ПО-ВИДИМОМУ, НЕ МЕНЯЕТСЯ, ТО ЕСТЬ ДЕЙСТВУЕТ КАК КАТАЛИЗАТОР**

Поль Сабатье (1854–1941), французский химик,  
Нобелевская премия по химии (1912)

так лечили от малокровия собак и людей. Благодаря присутствию кобальта этот витамин катализирует множество различных реакций, важных для метаболизма и производства красных кровяных телец. Эту сложную структуру установили первой среди металлоферментов с помощью рентгеноструктурного анализа (см. с. 88), и ее кропотливый

труд принес Дороти Кроуфут Ходжкин Нобелевскую премию по химии 1964 года. Среди других ферментов, в которых есть переходные металлы, — цитохромоксидаза: присутствующая в ней медь помогает извлекать энергию из пищи и растениям, и животным.

Нескольким миллиграммам витамина  $V_{12}$  у вас в организме необходимо лишь малюсенькое количество кобальта (не забываем: катализатор в реакции не расходуется). Все, что вы употребите сверх этой необходимости, может всерьез испортить вам здоровье. Той австралийской старушке заменили протез сустава на полиэтиленово-керамический, и ей полегчало буквально за несколько недель.

### ГУСТО И ШУСТРО

Переходные металлы — не только хорошие катализаторы биологических процессов. Они вообще хорошие катализаторы. Никель, серебристый металл, применяемый в производстве монет и высокоточных

деталей моторов, еще и умеет катализировать реакции, в которых получаются твердые жиры вроде маргарина. Это реакции гидрогенизации — они добавляют атомы водорода к углеродсодержащим молекулам и превращают ненасыщенные углеводороды (молекулы с двойными и тройными связями) в насыщенные. На рубеже XIX и XX веков французский химик Поль Сабатье понял, что никель, кобальт, железо и медь помогают гидрогенизировать ненасыщенный ацетилен ( $C_2H_2$ ) до этана ( $C_2H_6$ ). Он принялся использовать никель как наиболее эффективный для гидрогенизации самых разных углеродсодержащих веществ. Позднее, в 1912 году, он получил Нобелевскую премию за гидрогенизацию «в присутствии тонко измельченных металлов».

К тому времени пищевая промышленность уже начала применять никель как катализатор преобразования жидкого растительного масла в маргарин. Первым продуктом, содержащим рукотворный жир, стал «Криско» — марка растительного комбижира, используемого в хлебопечении.

Загвоздка с процессами, в которых участвует никель, заключается в примесях транс-жиров, частично гидрогенизированных веществ, на которых валят вину за проблемы со здоровьем у людей, включая повышенный холестерин и сердечные недуги. В начале нашего века правительства взялись решать эту проблему и ввели нормы содержания транс-жиров в пище. Ныне комбигир «Криско» транс-жиров не содержит.

Не все катализаторы — переходные металлы: множество разных других простых и сложных веществ могут ускорять химические реакции. И все же Нобелевскую премию по химии за 2005 год вручили за исследование реакций с металлокатализаторами — реакции метатезиса важны в процессах производства лекарств и пластмасс. А кобальт ныне применяется в самой передовой химии — в выделении водорода из воды (см. с. 200) для получения чистого топлива.

## Фотокатализ

Фотокатализ — химическая реакция, ускоряемая светом. Этот принцип использован в самоочищающихся стеклах: грязь на них разрушается под воздействием солнечных лучей. Воистину космическая технология — разработанные НАСА фотокаталитические «скребки»: космонавты, выращивая пищевые растения на борту космических станций, применяют эти фотокатализаторы, чтобы расщеплять этилен, от которого растения гниют.

## В сухом остатке: Нерасходуемые помощники реакций

# 13

## Окисление-восстановление

Многие обычные реакции происходят путем передела электронов между молекулами. Ржавление и фотосинтез в зеленых растениях — примеры таких реакций. Но почему они называются окислением-восстановлением (редокс)?

\* От англ. *reduction-oxidation* — восстановление-окисление.

**С**лово «редокс»\* похоже на название сиквела к приключенческому фильму, на самом же деле оно описывает разнообразие реакций, широко распространенных и в химии, и в природе, — растительный фотосинтез, например (см. с. 148), а также усвоение пищи у вас в кишечнике. Это процесс, в котором часто задействован кислород, и можно предположить, что часть «окисление» — отсюда. Но чтобы разобраться, почему эти реакции называются именно так, нужно понять, что именно в этих реакциях происходит с электронами.

Многое из того, что происходит в химических реакциях, можно отнести на счет приключений электронов, отрицательно заряженных частиц, образующих облако вокруг атомного ядра. Мы уже узнали, что благодаря электронам атомы держатся вместе; электроны участвуют в химических связях в веществах (см. с. 20), а когда частица теряет или приобретает электрон, нарушается равновесие заряда и получаются отрицательно или положительно заряженные частицы, также известные как ионы.

### УБЫТОК И ПРИБЫТОК

Для убытка и прибытка электронов у химиков есть специальные названия. Если атом или молекула теряет электроны, этот процесс именуют окислением, а если атом или молекула приобретает

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

3 млрд лет назад	XVII век	1779
Цианобактерии начинают фотосинтез	Понятием «восстановление» описывают превращение киновари (сульфида ртути) в ртуть	Антуан Лоран Лавуазье называет компонент воздуха, который реагирует с металлами, <i>оксигеном</i> — кислородом

## Степени окисления

Легко говорить, что редокс-реакции — это передача электронов, но как нам разобраться, куда электроны переходят — и сколько именно? Для этого нужно кое-что знать о степенях окисления. Степени окисления сообщают нам, сколько электронов атом может получить или потерять, когда соединяется с другим атомом. Начнем с ионных соединений: с ионами у нас есть подсказка — их заряд. Степень окисления иона железа ( $\text{Fe}^{2+}$ ), которому недостает двух электронов, — +2. Стало быть, этот ион хотел бы добыть себе эту недостающую парочку. Все просто, верно? Так же устроено и с другими ионами. В поваренной соли ( $\text{NaCl}$ ) степень окисления  $\text{Na}^+$  — +1, а у  $\text{Cl}^-$  она — 1. А с ковалентными связями как? В воде, например? В воде атом кислорода отбирает по одному электрону у двух атомов водорода и так дополняет свою внешнюю оболочку, и поэтому его степень окисления считаем равной — 2. Многие переходные металлы, например железо, в разных веществах проявляют разные степени окисления, но обычно можно разобраться, кто кому дал электроны, зная «нормальную» степень окисления этого металла. Зачастую (хотя не всегда) она определяется положением металла в Таблице Менделеева.

### Обычные степени окисления:

<b>Железо(III), алюминий +3</b>	<b>Фтор, хлор -1</b>
<b>Железо(II), кальций +2</b>	<b>Кислород, сера -2</b>
<b>Водород, натрий, кальций +1</b>	<b>Азот -3</b>

### Отдельные незаряженные атомы 0

электроны, это называют восстановлением. Существует множество способов запомнить эти обозначения, но, вероятно, самый простой таков: отдал — окислился, взял — восстановился.

Почему потеря электронов называется окислением? Окисление же должно быть с участием кислорода? Ну, так иногда и бывает, и потому окисление — понятие немножко путаное. Ржавление, к примеру, реакция между железом, кислородом и водой. Это окисление, таким образом, включает кислород. Но это еще и пример другого окисления. В процессе ржавления атомы железа теряют электроны и образуют положительно

**1880**

 Изобретение  
батарейки

**1897**

 Открытие электронов  
Джозефом Джоном  
Томсоном

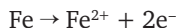
**XX век**

 Понятием «редокс»  
описывают реакции  
окисления-восстановления

**2005**

 Первая конференция  
*Mega Rust* («Mega-Ржавчина»)

заряженные ионы, то есть ионы железа. Вот как химики записали бы происходящее с железом (Fe):



$2\text{e}^{-}$  — это два электрона, которые теряет атом железа при окислении.

Эти два разных понятия об окислении на самом деле взаимосвязаны: понятие «окисление» распространяется на реакции, в которых кислород не участвует. Как уже говорилось, химики поминают ион железа в контексте того, сколько электронов потерял атом железа, чтобы стать ионом. Потеря двух электронов приводит к возникновению положительного заряда ( $2^{+}$ ), то есть у этой частицы на два протона больше, чем электронов.

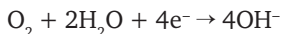
## МОРПЕХАМ ЕСТЬ ЧЕМ ЗАНЯТЬСЯ, ПОМИМО БОРЬБЫ С РЖАВЧИНОЙ

Мэттью Кох, программный директор по контролю и борьбе с коррозией, Корпус морской пехоты США

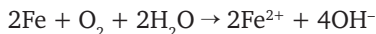
## ДВЕ ПОЛОВИНКИ РЕАКЦИИ

Что же происходит с электронами? Не могут же они взять и исчезнуть, а чтобы понять, куда они деваются, нужно включить в расчет кислород, участвующий в процессе ржавления. Железо теряет электро-

ны, одновременно с этим кислород их приобретает (восстанавливается), а следом объединяется с водородом и образует гидроксильные ионы ( $\text{OH}^{-}$ ):



Происходят реакция окисления и реакция восстановления — одновременно, и их можно объединить в одну:



Когда восстановление и окисление происходят одновременно, такой процесс и называется реакцией окисления-восстановления (редокс). Две половинки одной реакции, что логично, именуются полуреакциями.

Если вы задумались, почему у нас все еще не появилась, собственно, ржавчина (смесь оксидов железа), ответ такой: железу и гидроксильным ионам предстоит прореагировать друг с другом и образовать гидроксид железа ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), который, в свою очередь, взаимодействует с водой

и дополнительным кислородом, в результате чего получится гидратированный оксид железа (III) —  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Редокс-реакция, приведенная выше, лишь часть большего многостадийного процесса.

## И ЧТО?

Понимать, как именно происходит ржавление, довольно важно, потому что морским и авиаперевозчикам этот процесс обходится в миллиарды долларов ежегодно. Чтобы бороться с такой напастью, Американское общество морских инженеров проводит ежегодные конференции *Mega Rust* («Мегаржавчина») — собирает вместе специалистов в этой области.

Больше проку от окисления-восстановления, происходящего в процессе Габера (см. с. 68), — основы метода получения удобрений, а также от реакций, протекающих в привычных нам элементах питания (батарейках). Если вспомнить, что электрический ток из батарейки есть поток электронов, возникает вопрос, откуда эти электроны там берутся. В батарейке они перетекают из одного отсека в другой — в каждом отсеке происходит полуреакция: в одном электроны высвобождаются окислением, а в другом их принимают — в восстановлении. На пути у этого потока размещается прибор, который вы питаете от батарейки.

## Окислители и восстановители

В химических реакциях молекула, отбирающая электрон у другой, называется окислителем. Соответственно, восстановитель — вещество, которое электроны отдает. Жавелевая вода, или раствор гипохлорита натрия ( $\text{NaOCl}$ ), — сильный окислитель. Он отбеливает одежду, отрывая электроны у красителей ткани, тем самым меняя их структуру и уничтожая цвет.

## В сухом остатке:

## Отдать и получить электроны



# 14 Брожение

От неолитического вина до квашеной капусты, от древнего пива до исландских деликатесов из акульего мяса — история брожения переплетена с историей производства пищи и напитков. Археологи обнаружили, что реакции брожения, провоцируемые микроорганизмами, люди применяли задолго до того, как узнали о существовании микроорганизмов.

**В** 2000 году Патрик Макговерн, бывший студент-химик из университета Пенсильвании, заделавшийся молекулярным археологом, отправился в Китай — повозиться с кое-какой много-тысячелетней неолитической керамикой. Керамика как таковая его интересовала мало — его занимал налет на черепках. За следующие пару лет он со своими американскими, китайскими и немецкими коллегами подверг черепки 16 питьевых сосудов и банок, найденных в провинции Хэнань, различным химическим тестам. По их результатам исследователи опубликовали материал в серьезном научном журнале и описали ароматные жидкости, обнаруженные в бронзовом чайнике и склянке с крышкой, закупоренных 3000 лет назад и найденных в двух разных захоронениях.

Состав налета показал, что это один из древнейших питьевых продуктов сбраживания, приготовленный из риса, меда и плодов боярышника или дикого винограда. Нашлось некоторое сходство с составом ингредиентов современного рисового вина. Ароматные жидкости ученые описали как фильтрованные рисовые или пшеничные «вина», которые перебродили, вероятно, при помощи

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**7000–5500 до н.э.**

Древнекитайские напитки, полученные брожением

**1835**

Шарль Каньяр де ла Тур наблюдает выделение спирта дрожжами

**1857**

Луи Пастер подтверждает: для получения алкоголя нужны дрожжи

грибка, разрушившего сахара, входившие в состав исходного зерна. Макговерн обнаружил, что древние египтяне получали брожением пиво еще 18 000 лет назад.

**ФЕРМЕНТ, ПОМЕЩАЕМЫЙ В НАПИТОК, ДАБЫ ОН ДЕЙСТВОВАЛ, И В ХЛЕБ, ДАБЫ ОН ДЕЛАЛСЯ ЛЕГЧЕ И НАБУХАЛ**

Определение дрожжей из толкового словаря английского языка 1755 года

## ЖИВОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

Пивоварение, несомненно, древняя традиция, но лишь благодаря современной науке стало понятно, как оно происходит. В середине XIX века небольшое ученое сообщество сформулировало «микробную теорию» болезней: болезни порождаются микробами. В точности так же, как большинство людей не верили, что живые организмы могут вызывать заболевания, не верили они и в то, что живые организмы имеют какое-то отношение к процессам брожения и получения спирта. Хотя дрожжи человек применял издавна — в хлебопечении и сбраживании, — и даже понятно было, что дрожжи и возникновение алкоголя взаимосвязаны, дрожжи всегда считали просто ингредиентом, неживым. Но Луи Пастер — ученый, создавший лекарство от бешенства, — чьим именем назван процесс пастеризации, бросать изучение вина и болезней не желал.

С изобретением более мощных микроскопов взгляд на природу дрожжей начал меняться. И вот в статье 1857 года *Memoire sur la fermentation alcoolique* Пастер подробно описал свои эксперименты с дрожжами и брожением и однозначно установил: чтобы при брожении получался спирт, дрожжи должны быть живыми и способными к размножению. Пятьдесят лет спустя Эдуард Бюхнер получил Нобелевскую премию по химии за открытие роли ферментов (см. с. 132) в клетках — а начинал он работу с исследования ферментов, катализирующих реакции выработки алкоголя дрожжами.

## ПУЗЫРЬКИ И ПЛЮШКИ

Реакция, которую мы ныне увязываем с брожением, такова:

сахар  $\xrightarrow{\text{дрожжи}}$  этанол + диоксид углерода.

**1907**

Эдуард Бюхнер получает Нобелевскую премию за работу, вдохновленную ферментами дрожжевого брожения

**2004**

Опубликовано доказательство существования выпивки 9000-летней выдержки

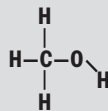
Дрожжи питаются сахаром, а ферменты дрожжей действуют как естественный катализатор (см. с. 48), благодаря которому происходит превращение фруктовых или зерновых сахаров в этанол — разновидность спирта (см. «Смертоносные напитки», ниже) — и углекислый газ. Тот же вид дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*), но другая их разновидность применяется в пивоварении. В любой упаковке дрожжей, добавляемой при изготовлении пива, находятся миллиарды дрожжевых клеток, но есть и дикие дрожжи, живущие на зерновых и фруктах, — на яблочной кожуре, например, которую используют при производстве сидра. Одни пивовары пытаются культивировать такие дикие породы, другие их избегают, поскольку они придают продукту неожиданные запахи. И при пивоварении, и при хлебопечении выделяется спирт, но в последнем спирт испаряется.

Именно диоксид углерода — побочный продукт брожения — придает хлебу воздушность: пузырьки застревают в тесте. Пузырьки также — секрет бокала хорошего шампанского. Виноделы, производящие шипучие вина, большую часть выделяющегося газа спускают, однако ближе к концу сбраживания закупоривают бутылки и запирают остаток газа внутри, в результате чего бутылка с шампанским, когда ее открывают, чпокает.

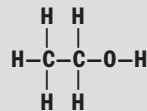
## Смертоносные напитки

Химически любой спирт — молекула, в составе которой есть ОН-группа. Этанол ( $C_2H_5OH$ ) часто считают синонимом просто спирта, однако спиртов существует великое множество. Метанол ( $CH_3OH$ ) — простейший из них, в его молекуле содержится лишь один атом углерода. Он также известен под названием «древесный спирт», поскольку получить его можно безвоздушным нагреванием древесины. Метанол гораздо ядовитее этанола и может привести к смерти от отравления, если его примесь случайно употребить с другим алкоголем. Определить его непросто, но обычно в коммерческих продуктах брожения он есть лишь в следовых количествах. Домашнее сбраживание или покупка паленых

алкогольных напитков в этом смысле опасны. Метанол смертоносен, потому что при попадании в организм превращается в метановую (муравьиную) кислоту — вещество, ассоциирующееся с муравьиными укусами. В 2013 году трое австралийцев умерли от метанолового отравления, выпив домашней граппы. Как ни парадоксально, лечить метаноловое отравление можно этанолом — приемом внутрь.



Метанол



Этанол

Углекислый газ, заточенный в бутылке шампанского, растворяется в жидкости, и получается угольная кислота. Когда бутылку открывают, он вновь превращается в газ и выпирает вместе с жидкостью наружу — в виде пены.

## СПИРТ И КИСЛОТА

Не стоит впадать в заблуждение, что брожение — это исключительно про пиво и хлеб или что оно бывает только посредством дрожжей. До изобретения холодильника ферментацией удавалось не давать рыбе портиться. В Исландии высушенное ферментированное акулье мясо, называемое *kæstur hákarl*, и ныне деликатес. А еще оно знаменито тем, что от него стошнило великого повара Гордона Рэмзи. Хотя ферментация часто означает именно сбраживание, то есть превращение сахара в спирт, она же означает и превращение его в кислоту. Квашеная капуста, характерная для немецкой и русской кухонь, — продукт ферментации: капусту подвергают действию бактерий и квасят в образующейся кислоте.

В последние годы продукты ферментации считают очень полезными для здоровья. Исследования показали, что кисломолочные продукты понижают риск сердечных заболеваний, инсульта и диабета. Полагают, что живые микробы в ферментированных продуктах благотворно влияют на бактерии, уже обитающие у вас в кишечнике. Но все же официальные нормативы осторожнее — и не зря, вероятно, поскольку о роли бактерий в человеческом кишечнике мы по-прежнему многого не знаем.

Пусть современные продукты здорового питания и совсем не похожи на вино 9000-летней выдержки, общее у них все же есть — живые микроорганизмы, занятые в химических реакциях получения восхитительных (или отвратительных) пищевых продуктов.

## Лактобактерии

В йогурте и сыре бактерии превращают сахар, содержащийся в молоке (лактозу), в молочную кислоту. Микроорганизмы, от которых зависит это превращение, называются лактобактериями, и для пищевой ферментации мы их применяем не одну тысячу лет. Похожее преобразование происходит в мышцах, когда они перерабатывают сахар без доступа кислорода. Накопление молочной кислоты провоцирует болезненное жжение в натруженных мышцах.

## В сухом остатке: Реакции выпивки и выпечки

# 15

## Крекинг

Были времена, когда нефть применяли лишь в старомодных лампах. Много чего поменялось с тех пор, а все благодаря крекингу — химическому процессу, при котором сырая нефть преобразуется в уйму полезных продуктов, которыми полон (и отравлен) наш современный мир, — от бензина до пластиковых пакетов.

**П**одумать только: наши автомобили ездят на мертвечине. Бензин в основном состоит из доисторических растений и животных, которые находились под давлением земных пород миллионы лет, и из них получилась нефть; ее выкачивают и превращают в продукт, который мы, сжигая, преобразуем в энергию. Тем, кто не знаком с нефтехимией, часть «превращения» может показаться несколько загадочной.

\* От англ. *crack* — ломать, расщеплять.

Химический трюк, посредством которого мертвечина, которую мы добываем из-под камней, то есть сырая нефть, превращается в полезные продукты, называется крекингом\*. И на выходе мы получаем далеко не только топливо. Много чего в нашей повседневной жизни вообще-то продукты крекинга. Что угодно, сделанное из пластмассы (см. с. 160), к примеру, скорее всего начало свою жизнь на нефтеперегонном заводе.

### МИР ДО КРЕКИНГА

В XIX веке, до изобретения крекинга, керосин (см. «Авиационное топливо», с. 62) был единственным полезным продуктом переработки нефти. Керосиновые лампы были новомодным способом освещать жилища, хотя пожаров от них случалось немало. Керосин получали перегонкой нефти — нагревали сырье до определенной

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1855	1891	1912	1915
Бенджамин Силлимен предполагает, что продукты перегонки нефти могут оказаться полезными	Выдан русский патент на термический крекинг	Выдан американский патент на термический крекинг	Британская государственная углеводородная компания превратилась в «Юниверсал Ойл Продактс»

температуры и ждали, когда керосиновая фракция выкипит и сконденсируется. Бензин — другая фракция, получаемая при перегонке, однако он так быстро выкипал, что его попросту сливали в какую-нибудь речку по соседству, поскольку нефтеперегонные предприятия не знали, что с ним делать. Великое множество возможностей, скрытых в сырой нефти, оставались неведомыми — но недолго.

**ЕСТЬ КРЕПКИЕ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ УВЕРЕННОСТИ, ЧТО ВАША КОМПАНИЯ РАСПОЛАГАЕТ СЫРЫМ МАТЕРИАЛОМ, ИЗ КОТОРОГО ПРОСТЫМ И НЕДОРОГИМ СПОСОБОМ МОЖНО ПРОИЗВЕСТИ ЦЕННЫЕ ПРОДУКТЫ**

Бенджамин Силлимен  
(1779–1864), американский химик,  
популяризатор науки, из отчета заказчику

В 1855 году американский профессор химии Бенджамин Силлимен, мнением которого в отношении добычи полезных ископаемых и минералогии всегда интересовались, сообщил о «каменном масле», найденном в округе Венанго, штат Пенсильвания. Кое-какие наблюдения, которые он изложил в том отчете, предсказали будущее нефтехимической промышленности. Он отметил, что, если тяжелое каменное масло нагреть, оно постепенно, в течение нескольких дней, испаряется, выдавая по очереди более легкие фракции; их-то как раз Силлимен счел потенциально полезными. Редактор из журнала «Американский химик» позднее отмечал, что Силлимен «предвосхитил и описал большинство приемов, нашедших в дальнейшем применение» в нефтехимической промышленности.

## ЧТО ЗА КРЯК?

Ныне легкие нефтяные фракции типа бензина — те самые, которые первые нефтеперегонщики сливали в реки, — наибольшая ценность. Именно изобретение крекинга сделало каменное масло мощным бизнесом — сначала термического, позднее — процессов с применением пара, а еще чуть погодя — современного каталитического крекинга, проводимого на синтетических катализаторах (см. с. 48).

Хотя происхождение крекинга не вполне известно, патенты на термический крекинг были выданы в 1891 году в России и в 1912-м — в США. Понятие «крекинг» — почти дословное описание происходящего с химической

### 1920

«Стэндрд Ойл»  
получает из нефти первое  
вещество — изопропанол

### 1936

«Эксон Мобайл Ойл» (в те поры  
«Сокони Вакуум Ойл»)  
и «Сан Ойл» строят установки  
для каталитического крекинга

### 2014

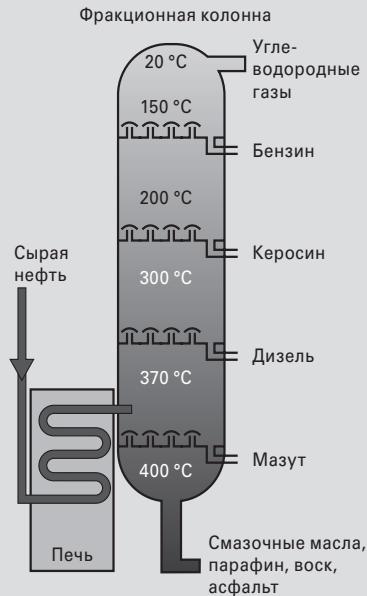
Керосин производится  
из углекислого газа, воды  
и солнечного света —  
процессом Фишера-Тропша

точки зрения: длинные углеводородные цепочки рвутся на молекулы поменьше. Процесс крекинга позволяет влиять на состав собранных в ходе прямой перегонки продуктов в соответствии с потребностями хозяина производства. Хотя бензин, который состоит из молекул, включающих от пяти до десяти углеродных атомов, можно получать прямой перегонкой нефти, крекинг позволяет получать его гораздо больше. Керосиновая фракция, к примеру, содержит молекулы с 12–16 углеродными атомами, и ее тоже, расщепив крекингом, можно переработать в бензин.

Первые крекинговые установки производили уйму кокса — угольного остатка, который приходилось выгребать раз в пару дней. Когда изобрели паровой крекинг, добавлением воды задача с коксом решалась, однако продукты получались не того качества, какое необходимо, чтобы бензиновый двигатель исправно работал. Должного качества удалось добиться, когда додумались до расщепления нефти при участии катализатора.

## Авиационное топливо

Керосин — маслянистая жидкость, применявшаяся в давние времена в осветительных лампах. В некоторых местах планеты керосин по-прежнему используют для освещения и обогрева, но самое ценное его применение в наши дни — авиационное топливо. Составляющие керосина — молекулы углеводородов с 12–16 атомами углерода, поэтому керосин тяжелее бензина, менее летуч и не так легко воспламеняется, и поэтому его безопаснее жечь в домах. Это не одно отдельное вещество, а смесь различных линейных и циклических углеводородных соединений, кипящих при более-менее одной и той же температуре. Керосин отделяют от сырой нефти перегонкой и крекингом — как и бензин, но бензиновые фракции кипят и конденсируются при температурах ниже. В 2014 году химики объявили, что создали авиатопливо — керосин — из углекислого газа и воды, применив активное воздействие солнечного света. Свет нагрел диоксид углерода и воду, получился синтез-газ (смесь водорода и оксида углерода), который далее превратили в топливо хорошо известным методом — процессом Фишера-Тропша (см. «Синтетическое топливо», с. 64 и 200).



Поначалу химики применяли глиноподобные материалы под названием цеолиты, содержавшие кремний и алюминий, пока не получили искусственные варианты этих природных материалов в лаборатории.

### ТОПЛИВО ИСТРЕБИТЕЛЕЙ

При паровом крекинге углеводороды часто поступают в процесс с одинарными связями и разваливаются на молекулы покороче, но с двойными связями. Этим можно воспользоваться и получить разнообразные другие вещества. Однако с появлением каталитического крекинга углеводороды не только расщепляются — они перестраиваются внутри, ветвятся. Разветвленные углеводороды — лучшее топливо, потому что двигатель внутреннего сгорания начинает «стучать», то есть работает так себе из-за линейных углеводородов, если их перебор.

Непосредственно перед Второй мировой войной в Маркус-Хук, Пенсильвания, была собрана первая установка каталитического крекинга, и у союзников появился доступ к топливу, какого не было у немецких люфтваффе. Сорок один миллион баррелей превосходного авиатоплива, полученного на этой установке, увеличило, как говорят, маневренность истребителей союзников и тем самым дало им преимущество в воздушных боях.

Каталитические процессы не только позволяют получить отличное топливо, они вообще сердце химической промышленности: благодаря им мы производим важнейшие для современной жизни вещества — например, полиэтилен. Если нефть рано или поздно закончится, нам потребуются придумать альтернативные способы получения этих продуктов. Производители веществ уже тянут руки к живым растениям, а не к давно мертвым. Одна немецкая компания продает краску, сделанную из резины — сладко пахнущего растения, используемого в парфюмерии.

### Шуховская башня

На улице Шаболовка в Москве стоит интересная 160-метровая радиовышка, задуманная и воплощенная Владимиром Шуховым в 1920-х годах. Шухов был замечательным человеком: он спроектировал первый и второй нефтепроводы в России, а также имел отношение к планированию системы водоснабжения Москвы. Первым в мире патент на термический крекинг получил он, опередив величайшего соперника России — Америку. В 2014 году Шуховская башня едва избежала сноса.

## В сухом остатке:

# Заставить нефть работать на нас



# 16

## Химический синтез

Сколько продуктов, применяемых вами дома ежедневно, содержат синтетические, то есть произведенные человеком, вещества? Вероятно, в отношении лекарств и многочисленных добавок в еде, которой вы питаетесь, вам все ясно, зато мысль об эластичном белье, которое на вас, или о набивке вашего дивана вам в голову пришла не сразу.

**П**одумайте о том, что на вас сейчас надето. Догадываетесь ли вы, из чего сделана ваша рубашка или нижнее белье? Посмотрите на ярлыки: что такое вискоза? Откуда берется эластан? Загляните на полочки в ванной. Что входит в состав зубной пасты? Шампуня? Что за пропиленгликоль такой? А уж если полезете в кухонные шкафы, откроете ящики с медикаментами (см. с. 176) и изучите состав, указанный на пачке жвачки, — еще больше удивитесь.

**Я ПРОСТО ЧЕЛОВЕК  
В ЭЛАСТАНЕ, КОТОРЫЙ  
УМЕЕТ ОЧЕНЬ БЫСТРО  
ПОВОРАЧИВАТЬ НАЛЕВО**

Оливье Жан (р. 1984),  
золотой олимпийский  
чемпион по бегу на коньках

Невероятно, сколько всяких веществ, из которых сделаны одежда, еда, моющие средства и лекарства, химики получили всего-то в прошлом веке. Эти синтетические соединения родились в лабораториях, а ныне производятся в промышленных количествах.

### НАТУРАЛЬНОЕ ИЛИ СИНТЕТИЧЕСКОЕ

Вискоза стала первым синтетическим волокном в истории химии. Из вискозного волокна получается мягкая ткань, подобная хлопчатобумажной и легко впитывающая красители — а также пот. Первые методы производства вискозы были разработаны в конце XIX века. Вискоза, в общем, не очень отличается от естественной волокнистой составляющей, получаемой из растений, — целлюлозы, однако вискозу на полянке

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1856	1891	1905	1925
18-летний химик Уильям Хенри Перкин выделяет первый синтетический краситель	Разработан процесс получения вискозы, поначалу названной искусственным шелком	Разработан первый промышленный метод получения вискозы	Выдан патент на процесс Фишера-Тропша

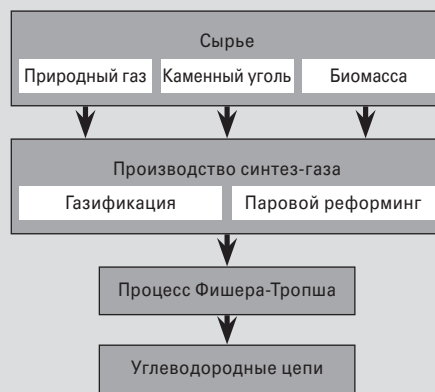
не вырастишь. Целлюлозу извлекают из перемолотой в кашу древесины химической и физической обработкой, и в результате получается желтый порошок ксантата целлюлозы. Далее ксантат разрушают кислотой, получаются волокна, подобные хлопковым, и это — практически чистая целлюлоза. Часто готовые ткани содержат смесь хлопка и вискозы.

Любой процесс, связанный с химическими реакциями для получения тех или иных полезных продуктов, можно считать химическим синтезом. Природные продукты типа целлюлозы тоже получают посредством химических реакций, происходящих в данном случае в живых растениях, однако химики считают такие вещества продуктами биосинтеза (см. с. 144).

Некоторые вещества, которые химики производят синтетически, — на самом деле копии природных веществ. В таких случаях искусственное получение организируют, поскольку выходит, как правило, дешевле или масштабнее, а не потому что люди ловчее природы. В природе все налажено очень неплохо. Основа химического вещества в лекарстве от гриппа «Тамифлю», к примеру, — шикимовая кислота, она выделяется из семян звездчатого аниса, растения, из которого получают китайскую пряность. Но поскольку сырья этого растения в природе маловато, химики постоянно придумывают способы получения нужного вещества с нуля. Таких методов уже есть немало,

## Синтетическое топливо

Синтез Фишера–Тропша — процесс получения синтетического топлива путем нескольких химических реакций с участием водорода и оксида углерода. Два эти газа (вместе именуемые «синтез-газ») обычно получаются из каменного угля. Методом Фишера–Тропша можно производить, минуя нефть, жидкое топливо, которое мы привычно мыслим как продукт нефтепереработки (см. с. 156). Компания SASOL в Южной Африке производит «синтез-топливо» уже не первое десятилетие.



Общий вид процесса получения синтез-топлива

**1962**

В широкой продаже появляется лайкра

**1985**

Первый прототип установки для синтеза больших количеств ДНК

**2012**

*Dial-A-Molecule* обнаруживает первый план смарт-синтеза

## Синтез-машины

Вообразим, что химикам не нужно городить целую систему химических реакций, чтобы получить желаемую молекулу. Представим, что им достаточно ввести описание нужной молекулы в некую машину и она сама придумает, как лучше всего эту молекулу получить, а дальше сразу берется ее создать. Это ж прямо революция в производстве лекарств и новых материалов! Так вот, для ДНК такие машины уже существуют. Машины для синтеза ДНК могут выдавать короткие отрезки ДНК с любой последовательностью нуклеиновых кислот. С какими-нибудь другими молекулами этот трюк, понятно, проверить труднее, в том числе — из-за недостаточной вычислительной мощности современной электроники. Синтез-машине потребуется молниеносно проложить путь создания вещества подбором среди имеющихся у нее в базе миллионов реакций и сравнить между собой миллиарды вариантов решения. Но, невзирая на скептицизм некоторых ученых, такие разработки уже ведутся. К примеру, группа британских исследователей из проекта *Dial-A-Molecule* («Вызов-молекулы») взялась за грандиозную задачу: сделать синтез любой молекулы «простым, как набор телефонного номера». Другой, американский, проект создал «химический Гугл», которому известны 86 000 правил химических процессов, и для нахождения лучшего маршрута синтеза он применяет алгоритмы.

но каждый приходится рассматривать в сравнении со стоимостью экстракции вещества из семян аниса.

## ШТАНЫ-ТЯНУЧКИ

Есть и такие синтетические продукты, которых с природой не связывает совсем ничего. Более того, их «неестественные» свойства — как раз то, чем они нам и полезны. Блистательный пример — эластан. Вы, вероятно, лучше знаете его по другим названиям — «лайкра» или «спандекс»: это тянущаяся ткань «по фигуре», которую так любят велосипедисты. Производитель одежды «Гэп», великий и ужасный, изготавливает одежду для йоги из смеси эластана и нейлона, а «Андер Армор Студио Люкс» — из эластана и полиэстера. Нынче эти кучерявые названия не производят на нас особого впечатления, однако в 1960-х появление спандекса произвело на рынке одежды целую революцию.

Как и молекулы целлюлозы в хлопковом волокне, длинные цепочки молекул эластана — полимеры, содержащие многократно повторенные химические звенья. Чтобы получить полиуретановые звенья, нужно провести несколько химических реакций, а потом еще несколько, но других, — чтобы соединить их в цепочку. Видимо, поэтому ученым компании «Дюпон» на разработку удачных производственных процес-

сов потребовалась пара десятков лет. В отличие от хлопкового волокна, у получившегося «волокна К» (так его поначалу окрестили) оказались новые поразительные и ценные свойства. Волокна эластана можно растягивать в шесть раз от начальной длины, а если затем отпустить, они

возвращаются к исходному состоянию. Они выносливее и выдерживают большее напряжение, чем природная резина. «Дюпон» выработал уютный продукт, и дамское поддерживающее белье внезапно стало гораздо удобнее.

## ХИМИЧЕСКИЕ КОСТЯКИ

Давайте еще раз вспомним о вашем гардеробе, о шкафчике в ванной и о кухонных буфетах. Подумайте, сколько еще покупаемых вами продуктов содержат материалы или составляющие, полученные в результате нескольких лет или десятилетий неустанного химического поиска. Число химических реакций, необходимых вашему домашнему хозяйству, не уместается в голове.

Многие продукты химического синтеза восходят в конечном счете к крекингу нефти (см. с. 60) как к надежному источнику необходимых реагентов. Если вам все еще интересно, что такое полипропиленгликоль, так это ингредиент в составе шампуней, который помогает вашим волосам впитывать влагу и благодаря этому сохранять мягкость, а делается он из пропиленоксида, который, в свою очередь, получается из крекингowego пропилена — например, обработкой его, последовательно, хлором, а затем водой и гашеной известью\*. Пропиленоксид применяется и при производстве антифризов, а также вспененных материалов для набивки мебели и матрасов. Вы, может, не знали этих цифр, но ежегодная мировая потребность в пропиленоксиде — свыше шести миллионов тонн, и не потому, что он сам по себе такой полезный, а потому что из него путем химического синтеза можно сделать множество различных бытовых продуктов.

\* Это так называемый хлоргидринный метод; распространен также и пероксидный.

Вот так и многие другие вещества образуют химический костяк, на который нарастает плоть промышленных продуктов. Лекарства и красители, пластмассы и пестициды, мыла и растворители — за что ни возьмись, с большой вероятностью химия в этом уже поучаствовала.

## В сухом остатке:

## Творим полезные вещества

# 17

## Процесс Габера

Фриц Габер открыл дешевый способ производства аммиака, и это одно из самых значимых открытий в истории XX века. Аммиак применяется в производстве удобрений, которые помогли накормить миллиарды людей, но на его основе делают и взрывчатку, и этот факт не ускользнул от внимания людей, коммерциализировавших процесс Габера прямо перед Первой мировой войной.

**А**нри Луи был сыном инженера Луи Ле Шателье. Его отец, увлекшись паровозами и производством стали, приглашал в дом многих знаменитых ученых. Анри Луи жил в Париже в 1850-х и был лично знаком со многими известными французскими химиками. Видимо, это их влияние: мальчик вырос и стал одним из величайших химиков в истории дисциплины, а его именем назван один из ключевых принципов в химии — принцип Ле Шателье (см. с. 36).

Принцип Ле Шателье описывает, что происходит в обратимых реакциях. Ирония судьбы: Ле Шателье, пытаясь провести одну из важнейших обратимых реакций в истории человечества, сорвал эксперимент, в котором мог бы получить вещество, ключевое для двух громадных отраслей промышленности — производства удобрений и оружия.

### НИТРАТНЫЕ ВОЙНЫ

Про удобрения иногда говорят, что они содержат «реакционно-способный азот», потому что азот в них — в такой форме, которую могут усваивать растения и животные, чтобы в их организмах

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1807	1879	1901	1907
Гемфри Дэви производит аммиак электролизом воды в присутствии воздуха	Чили объявляет войну за селитру Боливии и Перу	Ле Шателье бросает попытки получить аммиак	Вальтер Нернст получает аммиак под давлением

синтезировались белки. Эта форма принципиально отличается от неактивной ( $N_2$ ), в которой азот находится в атмосфере Земли. К началу XX века мир осознал потенциальные возможности реактивного азота в виде удобрений и, чтобы увеличить урожайность, взялся завозить природный минерал селитру, или нитрат калия ( $KNO_3$ ), из Южной Америки. Разгорелась война за богатые на селитру земли, и победила в ней Чили.

Меж тем в Европе возникла острая нужда в бесперебойном источнике аммиака на своей территории. Превращение обычного азота в реакционноспособный (связывание азота) — в аммиак, например, — было энергозатратно и дорого. Ле Шателье во Франции попытался решить эту задачу, взяв азот и водород и заставив их реагировать под давлением. Реакционная смесь взорвалась, едва не убив ассистента, работавшего у Ле Шателье.

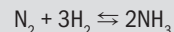
Позднее ученый понял, что его реакционная установка пропускала в смесь кислород воздуха. Он почти подобрался к правильному методу синтеза аммиака, но этот знаменитый процесс получил имя немецкого ученого Фрица Габера. К началу Первой мировой войны аммиак сделался важен еще по одной причине: его можно было использовать в производстве взрывчатых веществ — нитроглицерина и тринитротолуола (ТНТ). Аммиак, нужный Европе для создания удобрений, поглотила война.

## ПРОЦЕСС ГАБЕРА

Если бы не смертельно опасный взрыв, Ле Шателье, может, и не забросил бы разработку метода получения аммиака. В процессе Габера, как мы его теперь именуем, применяются принципы, предложенные Ле Шателье.

### Реакция получения аммиака

Обратимая реакция получения аммиака выглядит так:



Это реакция окисления-восстановления (см. с. 52). А еще это экзотермическая реакция, то есть протекает она с выделением тепла, и поэтому реакционную смесь не нужно сильно нагревать, процесс спокойно происходит и при довольно невысоких температурах, однако производство промышленных количеств аммиака все же требует нагрева. И хотя повышенные температуры слегка смещают равновесие влево (см. с. 36), в сторону азота и водорода, реакция протекает гораздо быстрее, то есть аммиака получается в единицу времени намного больше.

**1909**

Фриц Габер производит аммиак лабораторно

**1914**

В Европе начинается Первая мировая война

**1915**

Габер руководит газовой атакой на Ипре

**1918**

Габер получает Нобелевскую премию по химии

Важная реакция в синтезе аммиака — равновесие между двумя реагентами (азотом и водородом) и продуктом (аммиаком). Как и предсказывал Ле Шателье, извлечение из реакционной смеси одного из продуктов смещает равновесие и подталкивает реакцию скомпенсировать снизившуюся концентрацию продукта. И поэтому в процессе Габера аммиак постоянно выводят из реакции и тем самым подталкивают ее движение в сторону продукта.

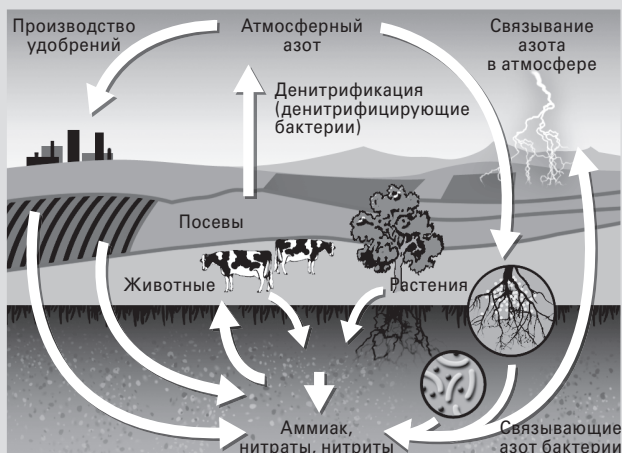
Катализатором Габера взял оксид железа. И здесь, оказывается, Ле Шателье тоже был недалек от истины. В книге, изданной в 1936 году, он писал, что пробовал применять металлическое железо. Габера вдохновили и работы по термодинамике авторства Вальтера Нернста, который получил

## Природно связанный азот

Селитра — природный минерал, содержащий азот в активной, или связанной, форме. До изобретения процесса Габера другим значимым источником получения реакционноспособного азота было перуанское гуано — помет морских птиц, гнездившихся вдоль побережья Перу.

В конце XIX века Европа ввозила и селитру, и гуано как удобрения. Есть и другие пути связывания азота. Молнии превращают небольшие количества азота воздуха в аммиак. Первые процессы получения аммиака

симулировали это явление — реакционную смесь подвергали действию электрических разрядов, но этот метод оказался слишком дорогим. Некоторые бактерии, обитающие в клубеньках зернобобовых растений — клевера, гороха, фасоли, — тоже умеют связывать азот. Поэтому фермеры часто практикуют севооборот — чтобы питательные вещества, усвоенные из почвы, восстанавливались и делали почву плодороднее для следующих посевов. Посев клевера выдает почвам «азотный кредит», то есть можно на следующий год вносить меньше удобрений.



аммиак еще в 1907 году. Однако именно Габеру достались лавры первооткрывателя. Как только в 1909 году ему удалось извлечь из своего лабораторного оборудования первые капли раствора аммиака, его коллега Карл Бош помог этот процесс коммерциализировать (иногда получение аммиака этим способом называют процессом Габера-Боша). Примерно через десять лет Габер получил Нобелевскую премию по химии, хотя решение это оказалось неоднозначным.

**Я УПУСТИЛ ОТКРЫТИЕ  
СИНТЕЗА АММИАКА. В МОЕЙ  
НАУЧНОЙ БИОГРАФИИ ЭТО  
ВЕЛИЧАЙШАЯ ПОТЕРЯ**

Анри Луи Ле Шателье  
(1850–1936)

По имеющимся сведениям, азот, применяемый с удобрениями, удваивает урожай. За век, прошедший со времен Габерова открытия, благодаря дешевому и энергосберегающему способу выработки аммиака удалось накормить четыре миллиарда людей — эти урожаи даже называли «хлебом из воздуха». Ле Шателье, может, и алкал славы за получение аммиака, но он, по крайней мере, сберег репутацию. За XX век в вооруженных конфликтах погибло более 100 миллионов человек, и Габер имел к этим смертям отношение.

Габер, вообще-то, доброе имя свое не берег. Он возглавил планирование хлорной атаки на реке Ипр в апреле 1915 года, унесшей жизни тысяч французских солдат. Жена Габера, умолявшая его бросить работу над химическим оружием, через несколько дней застрелилась. Да, Габер получил Нобелевскую премию, но вспоминают его без нежности. Ле Шателье же памятен за свои благородные усилия в объяснении принципов, управляющих химическим равновесием.

Аммиак все еще производят в массовых количествах. В 2012 году лишь в США было синтезировано 16 миллиардов килограммов. Ученые и поныне пытаются разобраться, каковы последствия попадания этого реакционноспособного азота с полей в реки и озера.

**В сухом остатке:**

**Химия, которая правит  
жизнью и смертью**



# 18

## Хиральность

Две молекулы могут выглядеть практически идентично, зато действуют они совершенно по-разному. Эта занимательная особенность в химии называется «хиральность»: существуют молекулы, у которых есть зеркальные двойники, то есть «левые» и «правые» версии. Вследствие этого у любого хирального вещества одна версия ведет себя ожидаемо, а вторая — вовсе нет.

**С**омкните ладони как в молитве — молиться не требуется, это для того, чтоб вы вспомнили об асимметрии ваших рук. Левая рука — зеркальное отражение правой: вам, может, кажется, что они одинаковые, а они строго противоположны друг другу. Как бы вы ни пытались, нет такого положения, в котором они бы совпали друг с другом. Даже современная медицина, способная на чудеса трансплантации, не сможет поменять вам руки местами, и чтобы они при этом продолжили выполнять исходные функции.

Некоторые молекулы — как наши руки. У них есть зеркальные близнецы, и их никак не совместить друг с другом. Все атомы вроде бы расположены одинаково — с виду устроены эти молекулы неразличимо, но при этом одна — отражение другой. Техническое обозначение этих левых и правых версий — энантиомеры. Любое вещество, у которого существуют энантиомеры, — хиральное.

Разницу понимает любой левша, пытавшийся применить ножницы для правойшей. Разница между двумя энантиомерами молекулы может проявляться в том, что один ведет себя ожидаемо, а второй...

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1848**

Луи Пастер обнаруживает хиральность у тартрата натрия-аммония

**1957**

Начато производство талидомида — в Германии

**1961**

Талидомид снимают с продажи

**1980**

Введено понятие энантиоселективного синтеза

нет. Топлива, пестициды, лекарства и даже белки у вас в организме — хиральные молекулы.

## ПЛОХИЕ И ХОРОШИЕ ВЕРСИИ

Есть целое направление в химии, посвященное производству хиральных веществ, в состав которых входит только нужная версия. В конечном счете цель коммерческого производства веществ — делать их столько, чтобы вышло выгодно. И поэтому, если реакция получения, скажем, нового лекарства дает на выходе смесь левых и правых молекул, а нужны только левые, реакцию нужно усовершенствовать.

Более половины всех современных лекарств — хиральные. И хотя многие производятся и продаются как смесь энантиомеров, один энантиомер в смеси все же действеннее как лекарство. Показательный пример — бета-блокаторы, применяемые при высоком давлении и сердечных болезнях. В некоторых случаях же, однако, «не тот» энантиомер может оказаться откровенно вредным.

Жутче примера «плохого» энантиомера, чем талидомид, не придумаешь: это лекарство, знаменитое своим воздействием на плод в утробе матери. Его поначалу прописывали как снотворное — еще в 1950-х, когда его только придумали, — но вскоре стали давать беременным женщинам от утренних недомоганий. Увы, один из энантиомеров этого вещества вызывал у эмбрионов развитие уродств. Считается, что более десяти тысяч детей родились с инвалидностью из-за талидомида. Судебные разбирательства между пострадавшими от этого лекарства и фармацевтическими компаниями идут и поныне.

## ТВОРИМ ЗЕРКАЛЬНЫЕ ОТРАЖЕНИЯ

Попытки синтезировать талидомид, содержащий только «хороший» вариант молекул, провалились, поскольку это вещество может менять свою конфигурацию внутри организма, и в результате получается смесь «плохих» с «хорошими».

### Рацематы

Смесь из левых и правых молекул в равных количествах называется рацематом (рацемической смесью). Когда молекулы лекарства талидомида образуют смесь энантиомеров, это называется рацемизацией.

**2001**

Нобелевская премия по химии присуждена за энантиоселективный синтез

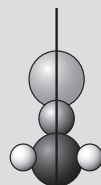
**2012**

Анализ осколков метеорита из озера Тагиш в Канаде показывает избыток левых аминокислот

## Как разобраться, хиральное ли вещество?

Две молекулы, составленные из одинаковых атомов, но по-разному организованные, называются изомерами. Но в хиральных веществах у обоих изомеров атомы скомпонованы одинаково. Такие молекулы идентичны практически во всем, кроме одного: они зеркальные отражения друг друга. Так можно ли по виду молекулы понять, хиральное это вещество или нет? Можно: у хиральной молекулы нет плоскости симметрии. Если провести воображаемую линию через центр молекулы и ее части по обе стороны совместятся, как у бумажной снежинки, например, — значит, молекула не хиральная. Однако вспомним, что молекула — трехмерный объект, и поэтому прямую линию через ее центр не всякий раз проведешь. Более того,

не по всякой молекуле, нарисованной на бумаге, можно сказать, хиральная она или нет. Для сложных молекул надо собирать трехмерные модели — например, из спичек и пластилина. (См. также «Сахара и стереоизомеры, с. 137.)



Плоскость симметрии



В этой молекуле никакой плоскости симметрии не сыскать

Некоторые вещества можно разделить на энантиомеры, можно и разработать реакции, в которых продукт — один конкретный энантиомер. В 2001 году двое американских химиков и один японский получили коллективную Нобелевскую премию за работу в хиральном катализе, который они применили для получения хиральных веществ, в том числе и лекарств. Премия частично досталась Уильям Ноулзу — за разработку реакций, производящих только «хорошую» версию лекарства под названием «допа», от болезни Паркинсона. Как и у талидомида, энантиомер допы ядовит.

В последние десятилетия властные органы, контролирующие вывод лекарств на рынок, все отчетливее понимают, какие беды может повлечь за собой «не тот» энантиомер. Производители лекарств когда-то творили препараты, содержавшие смесь левых и правых молекул, и считали менее эффективным (или неактивным) энантиомер просто балластом. Ныне пытаются создавать лекарства, содержащие только один из двух энантиомеров — полезный.

## ЖИВОЕ ОДНОСТОРОННЕ

В природе, однако, все иначе. Создавая хиральные вещества в лаборатории, химики обычно получают примерно равные количества правых и левых энантиомеров.

Но биологические молекулы в этом смысле предсказуемы. Что примечательно, аминокислоты, из которых состоят наши белки, все левые, а сахара — правые. Никто толком не знает, почему это так, но у исследователей, изучающих происхождение жизни на Земле, есть на сей счет разные теории.

Некоторые ученые предполагают, что молекулы, попавшие на Землю с метеоритами, могли подтолкнуть зарождающуюся на планете жизнь в сторону «левых» или «правых» молекул. Метеориты, падавшие на Землю, несли на себе следы аминокислот, и потому, вероятно, некоторое преобладание «левых» молекул на метеоритах могло повлиять на образование органических соединений в древних морях, в те же времена, когда на Земле формировались вещества будущей жизни. Как бы то ни было, похоже, изначально «левых» и «правых» молекул было не поровну, и со временем этот перекос усилился. Понятно, что вернуться на миллионы лет и проверить эту теорию мы не можем, и потому нельзя утверждать, что наблюдаемые исключительно «левые» белки не могли возникнуть позже, когда жизнь уже развилась.

Хиральность в биологических веществах — не просто забавный факт. Он помогает понять действие синтетических хиральных соединений как лекарств. Лекарства взаимодействуют с биологическими молекулами у нас в организме. Чтобы лекарство помогало, оно должно организму «подходить». Представьте, что надеваете перчатку, — на левую руку налезет только левая.

**АЛИСА ОСМЫСЛЯЛА МАКРОМИР,  
УВИДЕННЫЙ СКВОЗЬ ЗЕРКАЛА, И ЕЕ ВНИ-  
МАНИЕ ПРИВЛЕКЛА ХИРАЛЬНОСТЬ...**

Донна Блэкмонд (р. 1958),  
британский химик, профессор

**В сухом остатке:**  
**Зеркальные молекулы**

**В последние десятилетия возникла «зеленая» химия — практический подход к науке, ориентированный на уменьшение объема отходов производства и поиск новых рациональных реакций. А началось все с прибытия бульдозеров в Куинси, Массачусетс.**

**П**ол Энастэс вырос в Куинси, Массачусетс, где из дома его родителей некогда открывался вид на заболоченные просторы. Этот вид уничтожили хозяева одного большого бизнеса и их стеклянные высотки, что вдохновило Энастэса написать о своем крае очерк, за который он в девять лет получил Почвальную грамоту президента. Почти через двадцать лет, заработав докторскую степень по химии, он начал трудиться в Агентстве по защите окружающей среды и там написал манифест новой химии — более разумной и «зеленой». Позднее он стал известен среди химиков как «отец зеленой химии».

Еще 28-летним Энастэс под «зеленой» химией понимал науку, которая разрабатывает вещества и процессы, наносящие наименьший урон окружающей среде. Каким образом? В целом внедрением умных, экологически щадящих методов, уменьшением объема отходов и сокращением энергозатрат на химических производствах. Энастэс понимал, что промышленность от такого предложения в восторг не придет, и поэтому подал его под соусом «работай умнее = трать меньше».

## 12 ПРИНЦИПОВ «ЗЕЛеной» ХИМИИ

В 1998 году вместе с химиком из компании «Полароид» Джоном Уорнером Энастэс изложил 12 принципов «зеленой» химии. Вот к чему они сводятся:

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1991**

Пол Энастэс вводит понятие «зеленой» химии

**1995**

Учреждена Премия президента США «За дерзость в зеленой химии»

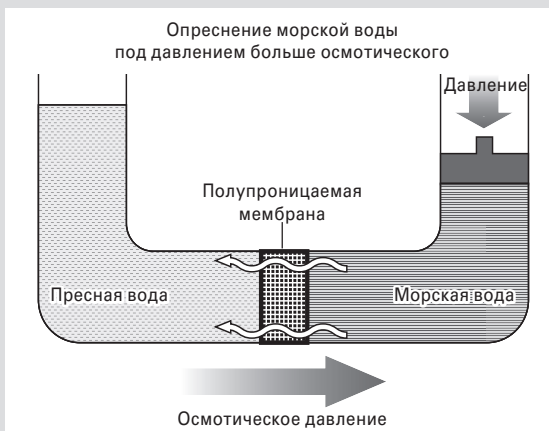
**1998**

Энастэс и Джон Уорнер публикуют книгу «Зеленая химия: теория и практика»

## Зеленое опреснение

Население планеты растет, планета делается засушливее, а это значит, что воды на планете может не хватать. Многие города по всему миру уже располагают установками опреснения и часть питьевой воды могут получать из морской. Однако изъять соль из морского рассола — штука энергозатратная: воду проталкивают сквозь мелкопористую мембрану. Методика называется «обратный осмос». Производство мембран для обратного осмоса требует больших расходов реактивов, в том числе растворителей.

В 2011 году одним из лауреатов премии «За дерзость в зеленой химии» стала компания, разработавшая способ создания новых недорогих полимерных мембран, на которые уходит меньше вредоносных реагентов. Мембраны НЕКСАР компании «Кратон» еще и сберегают энергию при опреснении и потенциально могут сократить расход реагентов вдвое.



1. Производим как можно меньше отходов.
2. Планируем химические процессы так, чтобы в дело шел каждый атом реагента.
3. Не применяем биологически опасные реагенты, не создаем биологически опасных побочных продуктов.
4. Разрабатываем менее ядовитые новые продукты.
5. Применяем более безопасные растворители, в меньшем количестве.
6. Бережем энергию.
7. Применяем возобновимое сырье.
8. Проектируем реакции, которые производят только нужные нам вещества.
9. Применяем катализаторы и так увеличиваем эффективность.

**2011**

Рынок «зеленой» химии достигает оборотов в 2,8 миллиарда долларов

**2020**

Обороты рынка «зеленой» химии, по прогнозам, 98,5 миллиарда долларов

10. Разрабатываем продукты, безопасно разлагающиеся в природе.
11. Следим за процессами во избежание утечек и возникновения биологически опасных побочных продуктов.
12. Выбираем методики, минимизирующие вероятность несчастных случаев, пожаров и взрывов.

Все 12 принципов говорят об эффективном подходе и к исходным веществам, и к продуктам, они акцентируют внимание на соедине-

**« МЫ ПОЙМЕМ, ЧТО ЗЕЛЕНАЯ ХИМИЯ ДОБИЛАСЬ УСПЕХА, КОГДА ИЗ ОБОРОТА ИСЧЕЗНЕТ САМО ПОНЯТИЕ ЗЕЛеноЙ ХИМИИ: ЭТО БУДЕТ ОЗНАЧАТЬ, ЧТО МЫ ЗАНИМАЕМСЯ ХИМИЕЙ ТОЛЬКО ТАК »**

Пол Энастэс (р. 1962),  
цитата из «Нью-Йорк таймс»

ниях, наносящих минимальный вред людям и окружающей среде. Простой здравый смысл, да? Но химическая промышленность давно привыкла работать иначе, поэтому пришлось все разложить по полочкам.

### В ДОМЕ ПРЕЗИДЕНТА

Энастэс стремительно превратился из рядового химика в руководителя отдела, а затем стал директором новой Программы зеленой химии в Агентстве по защите окружающей среды. В первый год своего директорства он предложил учредить несколько наград — чтобы поощрить достижения в области «зеленой» химии — и награды эти вручать не только отдельным ученым, но и производственным компаниям. Президент Билл Клинтон лично поддержал премию «За дерзость в зеленой химии». Это по-прежнему престижная награда.

В 2012 году одним из победителей назвали компанию «Бакмен Интернешнл»: ее химики придумали способ, как без использования уймы реагентов и энергии делать бумагу из вторсырья прочнее. Вдохновившись девятым пунктом в списке Энастэса-Уорнера, они применили фермент — биологический катализатор — и разработали реакции, в которых получаются волокна именно той структуры, какой надо. Они прикинули, что ферменты сэкономят любому бумажному комбинату до миллиона долларов в год, и тем подтвердили гипотезу «работай умнее = трать меньше».

В другие годы эту награду получили «зеленые» производители косметики, топлива и мембран для опреснения воды. Энастэс же тем временем, по приглашению самого Клинтона, начал работать в Отделе науки и техники

Белого дома — заниматься экологической политикой. Начав с президентской награды в девять лет, он учредил свою президентскую премию и поступил на службу в Белый дом, когда ему было всего 37.

## ЗЕЛЕНОЕ БУДУЩЕЕ

Согласно данным Агентства по защите окружающей среды, количество биологически опасных химических выбросов в США уменьшилось с 278 миллионов тонн в 1991 году, когда Энастэс еще только придумал «зеленую» химию, до 35 миллионов тонн в 2009-м. Компании начали обращать больше внимания на ущерб, наносимый окружающей среде. Впрочем, не стоит обольщаться: Энастэс-то молодец, много чего придумал и добрался до Белого дома, но проблемы промышленности в мгновение ока не решаются. Отнюдь. Многие важнейшие реактивы, от которых зависит производство продуктов ежедневного потребления, все еще делаются из нефти, а это невозстановимый ресурс, а также — потенциальный загрязнитель окружающей среды. Работы впереди невпроворот.

«Зеленая» химия по-прежнему молода. Ей предсказывают быстрый рост: по некоторым оценкам, к концу этого десятилетия ее обороты достигнут 100 миллиардов долларов. Но Энастэс не успокоится, пока не перекрасит всю химическую промышленность в зеленый. В интервью ведущему научному журналу «Нейчер» в 2011 году, после 20 лет трудов, Энастэс сказал, что его цель — добиться от мировой химии полного подчинения 12 принципам. Когда эта цель будет достигнута, понятие «зеленая» химия перестанет существовать — вся химия будет зеленой.

## Экономия вплоть до атома

Принципы «зеленой» химии включают в себя понятие экономии атома, и его придумали не Энастэс с Уорнером, а Бэрри Трост из Стэнфордского университета. В любой реакции можно оценить количество всех атомов реагентов и сравнить его с общим (оценочным) количеством атомов продукта: это соотношение подскажет, насколько экономно вы расходуете атомы. В «зеленой» химии каждый атом на счету.

## В сухом остатке:

## Химия, щадящая природу



Хоть кофейную заварку отцеживай от утреннего напитка, хоть аромат жасмина выделяй из цветков или героин из крови на месте преступления — мало найдется в химии процедур более распространенных, чем отделение одного вещества от другого. Голландское название химии вообще переводится как «искусство разделения».

В любом теледетективе есть эпизод, где команда криминалистов вваливается на место преступления и берет ситуацию в свои руки. Чем они потом заняты, нам неизвестно. Мы не знаем, что происходит в лаборатории. Мы видим лишь, как они приезжают, облачаются в эти свои бумажные комбинезоны, а через несколько минут следователь — мистер Мне-всё-ясно — зачитывает результаты. Преступление раскрыто.

Интересно было бы поглядеть, что же на самом деле происходит в отделе криминалистики. Тамошние умельцы уж точно знают толк в химическом разделении. Вообразите: возвращаются они с места какого-нибудь особенно жуткого преступления. Всюду кровянища и следы приема наркотиков. Первое, что криминалисты захотят выяснить, — кто именно принимал запрещенные препараты. В их распоряжении образцы крови, но как добыть из них наркотические вещества и установить их состав? Стоящая перед ними задачка — посложнее извлечения канцелярских скрепок из лоханки с рисом. У нас тут два вещества в жидком виде, их вручную не разделить.

### ХРОМАТОГРАФИЯ

Криминалисты справятся с этой задачей при помощи одной из хроматографических методик. По сути, они заставят наркотическое вещество осесть на чем-нибудь — из соображений, что оно

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Древний Египет	1900	1903	1906	1941
Аромат извлекают из цветков, применяя жиры	Михаил Цвет впервые применяет хроматографический метод	Первая статья по хроматографическим методикам	Михаил Цвет вводит понятие «хроматография»	Мартин и Синг изобретают распределительную хроматографию

к какому-нибудь «липучему» материалу прицепится, а кровь — нет. Примерно как вытягивать скрепки из тазика с рисом при помощи магнита. В криминалистской терминологии наркотик (скрепка) — анализ, или же анализируемое вещество.

## ДУХИ И КРАСКИ

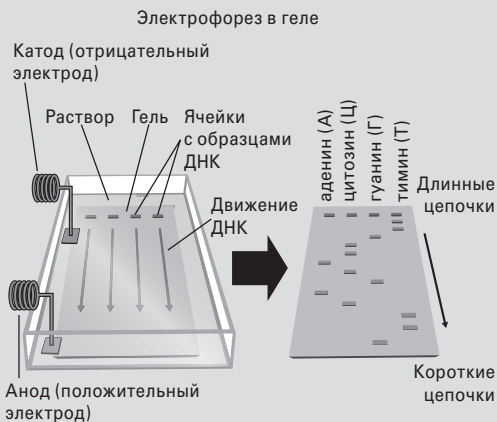
В принципе, любая современная хроматография похожа на методы экстракции, веками применявшиеся в промышленности, в том числе и в парфюмерии. «Липучий» материал не обязательно должен быть твердым. Парфюмеры, экстрагируя из жасминовых цветков вещества, отвечающие за запах жасмина, применяют жидкие реагенты — например, гексан. Главное, чтобы пахучие вещества имели большую аффинность (сродство) к жидкости, чем к веществам в составе цветка.

Многие знакомы с хроматографией, потому что в школе нам всем выдавали бумажные полоски, и мы разделяли различные цветные чернила или красители — то были наши анализы. Два разных красителя по-разному взаимодействуют с бумагой и потому образуют на бумаге два отдельных, по-разному окрашенных пятна. Понятие «хроматография» само по себе буквально означает «цветопись». Один из первых ученых, работавших над хроматографическими методами в 1900-х, был ботаником и применял бумагу для разделения растительных пигментов. Но лишь в 1941 году Арчер Мартин и Ричард Синг объединили жидкостной

## Электрофорез

Электрофорез — общее название многих методов разделения молекул (белков и ДНК, например) при помощи электричества.

В гель или жидкость добавляют образцы разделяемой смеси, и молекулы разделяются в соответствии со своим поверхностным зарядом: отрицательно заряженные движутся к аноду, положительно заряженные — к катоду. Чем мельче молекула, тем шустрее она перемещается, поскольку среда сопротивляется ее движению меньше, и таким образом можно разделять компоненты смеси и по размеру частиц.


**1945**

Эрика Кремер и Фриц Приор разрабатывают метод газовой хроматографии

**1952**

Мартин и Синг получают Нобелевскую премию по химии

**1970**

Чаба Хорват вводит понятие ВЭЖХ — высоко-эффективной жидкостной хроматографии

**1990**

Первое сообщение о капиллярном электрофорезе в секвенировании (определении аминокислотной или нуклеотидной последовательности биополимера, от лат. *sequentum* — последовательность) ДНК

## Отделяем пшеницу от муки

Методы разделения широко применяются и в аналитике на пищевых производствах. Есть компании, помогающие производителям продуктов питания отслеживать инородные вещества, затесавшиеся в готовую продукцию, а обнаружить их означает отделить от других ингредиентов. Перво-наперво, речь о примесях в продуктах, про которые объявлено, что они не содержат глютена (клейковины) или лактозы. У людей с непереносимостью этих веществ даже следовые количества их могут вызвать недомогание. Аналитики пищевых продуктов обнаруживают эти примеси хроматографически. К примеру, в исследовании 2015 года немецкие ученые описали новый метод выявления примесей пшеницы в муке из полбы. Загвоздка в том, что пшеницу и полбу часто скрещивают. Полба проще усваивается, но гибридные сорта содержат гены и той и другой, и многие белки у них одинаковые. И все же исследователи обнаружили белок, свойственный только пшенице, — глиадин. Ученые показали, что при помощи ВЭЖХ можно определить, есть ли в полбе пшеничный компонент: глиадин на хроматограмме будет виден. Тот же метод можно применять для классификации злаков — есть в них глиадин или нет.

метод экстракции, подобный используемым в парфюмерии, и незадолго до этого изобретенную распределительную хроматографию — применили гель для разделения аминокислот.

## ДВИЖЕНИЕ ВВЕРХ

В школьном эксперименте с красками есть так называемая неподвижная (стационарная) фаза — бумажка («магнит» или «липучее» вещество) — и подвижная, то есть краска, потому что она движется по бумажному листку. Хотя современные криминалисты более высокотехнологично экипированы, названия у фаз те же. Две самые используемые методики хроматографии — газовая и высокоэффективная жидкостная, где применяют высокое давление. Обе годятся для выделения наркотических и взрывчатых веществ и следов пороха. А еще их можно применять совместно с масс-спектрометрами (см. с. 84), эти приборы помогают криминалистам понять, что именно за вещество было выделено из полевых образцов. Например, молекулярный «след» аналита может быть опознан как героин.

Чтобы точно установить личность человека с героином в крови, криминалисты могут применить и капил-

лярный электрофорез (см. с. 81) — еще одну популярную методику разделения. При электрофорезе нарезанная на фрагменты молекула ДНК (аналит) под действием электричества протискивается по узеньким каналам, и происходит специфическое разделение в зависимости от ДНК-профиля носителя. Полученный в результате электрофореза профиль ДНК можно сверить с пробой крови или волос, взятой у подозреваемого. Подлинное мастерство криминалиста — выбрать, какой

метод или их сочетание подойдут в том или ином случае лучше прочих. Бывает, задача лишь в том, чтобы определить, героин это или нет, однако иногда, прежде чем даже засечь вещество, приходится преодолеть несколько стадий разделения.

**В ГОЛЛАНДИИ ХИМИЮ И ПОНЫНЕ ИМЕНУЮТ «ШЕИКУНДЕ», ИЛИ «ИСКУССТВО РАЗДЕЛЕНИЯ»**

Арне Тиселиус (1902–1971),  
шведский биохимик, профессор,  
член Нобелевского комитета (1952)

## ДРУГИЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

Разумеется, не одни лишь криминалисты применяют химическое разделение, пусть у них профессия и броская. Разделение — стандартный аналитический метод в химии. Стоит упомянуть еще и старую добрую перегонку — разделение смеси жидкостей на основании разницы в их температурах кипения (см. с. 60), а также центрифугирование, позволяющее разделять вещества по их плотности. Вы, наверное, уже отметили закономерность: любое разделение в химии пользуется разницей в свойствах веществ. И напоследок вспомним про фильтр для кофе: он физически отделяет твердые кофейные частицы от напитка — такое разделение основано на фазовых свойствах этих двух субстанций. Фильтрование — тоже распространенный метод разделения; химики, чтобы ускорить этот процесс, нередко применяют вакуумные насосы. Есть и другие лабораторные методы, сообщающие химикам о составе смесей и сложных веществ.

**В сухом остатке:  
Чему вас не научат теледетективы**

Для большинства из нас спектры — диковинные графики вроде каракулей или горбов, какие попадаются в научных статьях в разделе «Результаты». Однако ученый глаз видит в этих узорах затейливые подробности о молекулярном составе того или иного вещества. Один из методов получения таких картинок еще и ключевой способ диагностики рака — речь об МРТ.

**Ч**еловеку с опухолью в мозге, пришедшему делать МРТ (магнитно-резонансную томографию), велят лечь внутрь машины, оборудованной мощным магнитом. Получаемая при этом картинка позволяет разглядеть опухоль на фоне прилегающих тканей, и на основании такого снимка врачи будут решать, оперировать или нет. МРТ, иными словами, влезает пациенту в голову, не причиняя ему никаких страданий или ущерба. Нужно просто лежать смиренно, чтобы картинка не смазалась.

Безопасность МРТ время от времени приходится специально подчеркивать. А все из-за того, что эта методика — прямой потомок ядерной МРТ, а все, к чему добавляют «ядерный», людей по понятным причинам нервирует. Действие и МР-томографии, и ЯМР-томографии основано на естественном свойстве некоторых атомов: их ядра ведут себя наподобие крохотных магнитов. Приложением мощного магнитного поля такие ядра меняют поведение. С помощью радиоизлучения можно следить за этими переменами в поведении, и машина ЯМРТ способна извлекать информацию об окружении этих ядер, а МРТ — о мозге пациента.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1945**

Эдвард Пёрселл и Феликс Блох независимо друг от друга открывают явление ЯМР

**1955**

Уильям Добен и Илайас Кори применяют ЯМР для исследования молекулярных структур

**1960**

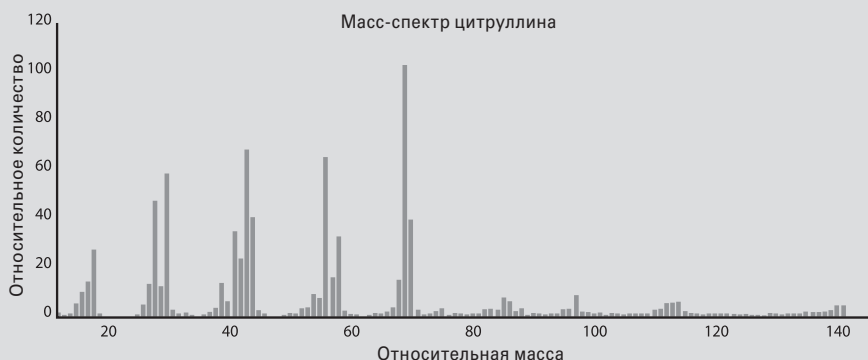
Первый коммерчески успешный аппарат ЯМР — «Вариан А-60»

## ОТ ЯМР К МРТ

Пол Лотербур [Лотербёр], химик, сыгравший столь важную роль в развитии МРТ и получивший за это Нобелевскую премию 2003 года, изначально был специалистом в ЯМР. Он обучился этой методике в лабораториях Института Меллона еще в 1950-х, в аспирантуре, и продолжил работать над ней в Вооруженных силах США, хоть и недолго. Говорят, он был единственным человеком, знавшим, как обращаться с единственным новеньким аппаратом ЯМР в Военном химическом центре. Примерно в те поры «Вариан Ассошиэйтс» разработали первую коммерческую ЯМР-установку — «Вариан А-60». Вскоре ее начали куда шире применять в медицине.

## Младенческий анализ

Масс-спектрометрия — одна из методик, применяемых для анализа веществ в крови новорожденных: с ее помощью засекают вещества, которые могут быть признаком возможных заболеваний. К примеру, высокое содержание аминокислоты цитруллина может означать, что у ребенка врожденная цитруллинемия, при которой в крови накапливаются яды, что приводит к рвоте, судорогам и отставанию в росте. Цитруллин вовлечен в процессы метаболизма, а еще он яркий биомаркер ревматоидного артрита. Цитруллинемия — редкое, но смертельно опасное заболевание, если сразу его не лечить. Масс-спектрометрия — точный аналитический метод, он помогает одновременно выявить сразу несколько веществ, то есть одного образца крови достаточно для определения множества заболеваний разом.


**1973**

Пол Лотербур  
разрабатывает  
метод МРТ

**2003**

За открытие МРТ присуждают  
Нобелевскую премию

**2011**

Американское химическое общество  
присваивает «Вариану А-60» статус  
Национальной исторической вехи  
в химии

Чаще всего получают ЯМР-спектр водорода, который есть в воде, а значит — и в плазме крови, и в живых клетках. Ядра водорода действуют как магниты, и методом ЯМР получается отображение головы пациента. В 1971 году Лотербура заинтересовало одно исследование раковых клеток, которое вел некий врач. Состав воды в раковой клетке отличается от здоровой, и Реймонд Дамадьян показал, что с помощью ЯМР можно различать пораженные и здоровые клетки, хотя исследования он проводил на крысах, и приходилось жертвовать этими зверьками ради получения спектрограмм. Лотербур не только понял, как превратить спектраль-

**ДО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЯМР... [ХИМИКУ]  
НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТРОЙСТВА  
МОЛЕКУЛЫ ПРИХОДИЛОСЬ ТРАТИТЬ  
ЦЕЛЫЕ МЕСЯЦЫ, А ТО И ГОДЫ**

Поль Адриен Морис Дирак (1902–1984),  
британский физик-теоретик, один из создателей  
квантовой механики, цитата 1963 года

ные данные в картинку (хоть поначалу и размытую), но и нашел способ, как делать томограмму, не уронив ни волоса с головы пациента.

Ко времени присуждения Лотербуру Нобелевской премии в 2003 году человечество знало ЯМР уже четверть века, и этот метод стал одним из важнейших аналитических подходов в химических

лабораториях по всему миру. Водород присутствует в атомах любого органического вещества, и в ЯМР-спектрах у протонов есть характеристические пики, соответствующие ядрам водорода в различных окружениях, то есть рисунок на спектрограмме зависит от организации связей водорода с другими атомами в молекуле. Химику-органику это расположение много чего сообщает об устройстве этой молекулы, и такие сведения можно применять к анализу структур новых веществ или идентификации уже известных.

## ЧТЕНИЕ ПИКОВ

ЯМР-спектр молекулы образует узор — химический «автограф», помогающий опознать то или иное вещество. Но есть и другие виды этих самых отпечатков, и, подобно ЯМР-спектру, толковать их можно, зная положение характеристических волн или пиков в спектрах различных веществ. В масс-спектрометрии разные пики соответствуют разным фрагментам молекулы — ионам, получающимся, если пучком электронов высокой интенсивности разломать молекулу на части. Положение пика внутри спектра указывает на массу того или иного фрагмента, а высота пика — на количество таких фрагментов. Это позволяет исследователям определять составляющие неведомого вещества, а разобравшись, как они друг к другу крепятся, — устройство и всей молекулы.

## ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ

Еще одна важная аналитическая методика — инфракрасная (ИК) спектроскопия; в ней применяют ИК-излучение, которое усиливает колебательную активность связей между атомами. Разные химические связи колеблются по-разному, и ИК-спектр — это набор пиков, соотносимых с отдельными связями. Связь О–Н в спиртах, например, выдает особые спектральные пики, хотя картинку могут усложнять колебания находящихся рядом связей и наложение пиков друг на друга. Как и в других спектрах, в ИК вырисовывается молекулярный «автограф»; имея должный опыт, можно разобраться в нем и понять, что перед нами за вещество.

Все эти методы идентификации применяют не только химики, перепутавшие пробирки. Их можно использовать для слежения за химическими реакциями и достаточно точной идентификации больших биомолекул: метод позволяет засечь даже одну аминокислоту в длинной белковой цепочке. Масс-спектрометрию широко применяют в разработке и тестировании лекарств, в анализе крови новорожденных (см. «Младенческий тест», с. 85) и при выявлении примесей в пищевых продуктах.

## Спектральный скандал

В химии доказательство, что реакция действительно произошла, часто опирается на ЯМР-спектры продуктов реакции. От этого доказательства может зависеть, опубликуют вашу статью или нет. При подобных высоких ставках найдутся люди, готовые мухлевать с результатами и таким образом подкреплять свою точку зрения. В 2005 году у Бенгу Сезен, химика из Колумбийского университета США, отвергли несколько научных работ, после того как выяснилось, что она вклеила в ЯМР-спектрограммы пики, подтверждающие нужные ей результаты.

## В сухом остатке: Молекулярный автограф



# 22

## Кристаллография

Любое применение рентгеновских лучей почему-то сразу напоминает нечто научно-фантастическое, особенно когда для этого требуется оборудование стоимостью во много миллионов фунтов стерлингов. Кристаллография — более чем в пределах науки, что никак не умаляет ее обалденности.

**С**легка к югу от Оксфорда (Англия) в окружении зеленых полей стоит сверкающее серебристое здание. С пролегающей рядом дороги оно смахивает на стадион, но будете ехать мимо — не обманитесь. Внутри этого здания ученые разгоняют электроны до немыслимых скоростей и так генерируют световые лучи в десять миллиардов раз ярче солнечных. В здании размещается «Даймонд лайт сорс» — самое дорогое научное заведение в истории Великобритании.

Синхротрон «Даймонд» — родственник Большому адронному коллайдеру; он тоже ускоритель элементарных частиц, только частицы в нем не сталкивают друг с другом, а излучение от них фокусируют на кристалле в несколько тысячных миллиметра в поперечнике. С помощью сверхъяркого света синхротрона ученые вглядываются в отдельные молекулы и выясняют, как атомы связаны друг с другом.

### РЕНТГЕНОВСКОЕ ЗРЕНИЕ

«Даймонд» производит чрезвычайно мощное рентгеновское излучение. Открыл его в 1895 году Вильгельм Рентген [Вильхельм Рёнтген], и ему — и в нынешнем веке, и в прошлом — мы обязаны пониманием устройства важнейших биологических молекул, а также

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1895	1913	1938	1946
Открытие «икс-лучей» Вильгельмом Рентгеном	Уильям Брэгг с сыном применяют рентгеновское излучения для исследования устройства кристалла	Ходжкин описывает структуру холестерина	Ходжкин описывает структуру пенициллина

лекарств и даже самых затейливых материалов, разработанных для производства солнечных батарей, строительства современных зданий и очистки воды.

Теория метода проста: рентгеновские лучи, проходя сквозь вещество, рассеиваются (претерпевают дифракцию), и по особенностям этого рассеяния можно судить о том, как атомы и молекулы вещества организованы

в трехмерном пространстве. Картина рассеяния — совокупность точек, появляющихся на детекторе, когда в него попадают рентгеновские лучи. На самом же деле все очень непросто. Методика под названием «рентгеноструктурный анализ» требует в качестве исследуемого образца монокристалл — аккуратно упорядоченные ряды молекул. Не все вещества с легкостью образуют монокристаллы. Лед и соль — да, а вот вещества, состоящие из больших сложных молекул — белки, например, — приходится уговаривать.

Придумать, как вырастить монокристалл, — целое дело, на него могут уйти годы или даже десятилетия. Так получилось и у израильского химика Ады Йонат — она решила вырастить кристалл рибосомы. Рибосома — машинка по производству белка в живой клетке. Рибосомы есть в клетках у всех живых существ, даже у микробов, а значит, понимание устройства этой органеллы может помочь бороться с уймой опасных болезней. Беда в том, что сама рибосома состоит из множества разных белков и других молекул, то есть из сотен тысяч атомов, и это потрясающе сложная конструкция.

## КРИСТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Начав в конце 1970-х, Йонат более десяти лет пыталась кристаллизовать рибосомы различных бактерий, чтобы потом исследовать кристаллы при

### Дороти Кроуфут Ходжкин (1910–1994)

Ходжкин помнят как одного из выдающихся ученых XX века. Она читала лекции и была любимым научным руководителем у себя в лаборатории, где среди ее студентов была и Маргарет Тэтчер, будущий премьер-министр Великобритании. А еще Ходжкин занимала пост канцлера (почетного ректора) Бристольского университета и участвовала в гуманитарных акциях. Ее лицо запечатлено на двух марках Британской почты.

**1956**

Ходжкин описывает структуру витамина B<sub>12</sub>

**1964**

Ходжкин получает Нобелевскую премию за исследование кристаллических структур биологических молекул

**1969**

Ходжкин описывает структуру инсулина

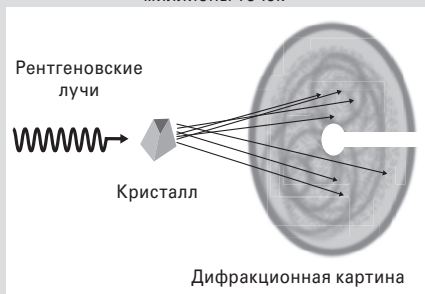
**2009**

Нобелевская премия присуждена за исследование устройства рибосомы

## Рентгеновское постижение

Современные ученые могут извлекать данные о кристаллической структуре образцов многократно меньших, чем те, с какими работала Дороти Ходжкин в 1940-е годы. А все потому, что в наши дни есть возможность генерировать значительно более мощное рентгеновское излучение. Сейчас его получают, разгоняя электроны в ускорителях элементарных частиц. Такие электроны испускают электромагнитное излучение, которое и именуют рентгеновским. Это излучение похоже на видимый свет, но с гораздо меньшей длиной волны. Видимый свет в исследовании структур на атомном уровне использовать нельзя: любая волна в этом диапазоне длиннее размеров одного атома и, проходя сквозь образец, не будет рассеиваться. Исследуемые кристаллы помещают на нечто подобное булавочной головке и охлаждают, а затем подвергают облучению. Рассеяние (дифракция) луча создает на детекторе специфический рисунок — дифракционную картину.

Рентгеновские лучи проходят сквозь мишень и рассеиваются, оставляя на детекторе миллионы точек



помощи рентгена. Когда наконец удалось кристаллы приличного качества, получившиеся рентгенограммы оказалось не так просто расшифровать, да и разрешение у них было довольно скверным.

Лишь в 2000 году, через тридцать лет поиска и в сотрудничестве с другими учеными, которые разделили с ней Нобелевскую премию, полученные Йонат рентгенограммы сделались наконец достаточно отчетливыми, чтобы по ним можно было прочесть устройство рибосомы на молекулярном уровне. И все же это была победа. Когда Йонат бралась за эту задачу, никто не верил, что ее можно решить. Недавно производители лекарств начали применять результаты исследований Йонат и ее коллег в создании новых препаратов, способных побеждать бактерии, устойчивые к лекарственному воздействию.

Ада Йонат, впрочем, не единственная женщина, посвятившая свою жизнь кристаллографии. Вообще вся эта область химии развилась благодаря Дороти Кроуфут Ходжкин, выяснившей кристаллическое устройство многих важных биологических веществ, в том числе холестерина, пенициллина, витамина  $B_{12}$  и — уже после вручения ей Нобелевской премии — инсулина. Вопреки постоянным болям от ревматоидного артрита, который у нее открылся в 24 года, она своей работой неустанно доказывала неправоту сомневавшихся в ней. Она исследовала пенициллин во время Второй мировой войны, когда кристаллография была еще совсем юной и на ее методы смотрели с недоверием. По крайней мере один ее коллега по Оксфордскому университету высмеял

предложенную ею структуру, которая позднее оказалась верной. С той структурой она разобралась всего за три года, а инсулину Ходжкин посвятила более тридцати лет.

### ПЕРЕХОДИМ НА «ЦИФРУ»

Во времена Ходжкин во всем применяли фото-пленку — рентгеновские лучи проникали кристалл и попадали, рассеявшись, на фотопластины, которые размещались позади образца. Пятна на фотоматериале образовывали рисунок, посредством которого Ходжкин надеялась выявить атомную структуру вещества. Ныне рентгеновская кристаллография делается на цифровых детекторах, не говоря уже о мощных ускорителях частиц вроде «Даймонда» и компьютеров, способных разбираться в данных и производить сложные расчеты, необходимые для понимания кристаллических структур. Именно Ходжкин сражалась за компьютеризацию Оксфорда, попользовавшись компьютерным парком Манчестерского университета при изучении структуры витамина B<sub>12</sub>. Но в докомпьютерную эпоху ей приходилось производить сложнейшие математические расчеты силами своего невероятного ума.

Похоже, рентгеноструктурный анализ и его поклонники не прогадали. Некоторые ученые, может, и сомневались в этом подходе, но уже с 1960-х кристаллографические методики помогли понять устройство более чем 90 000 белков и других биологических веществ (см. с. 152). Рентгеноструктурный анализ — первое средство, к которому прибегают при изучении устройства вещества на атомном уровне. И хотя сейчас метод уже вполне развит, у него все еще есть внутренние ограничения, которые предстоит преодолеть. Выращивать безупречные кристаллы — штука непростая в любом случае, и поэтому ученые ищут способы исследовать кристаллы не ах какие безупречные. И через 60 лет после того, как Ходжкин взялась за свое долгое изучение инсулина, ученые из НАСА получили возможность взглянуть на эту молекулу отчетливее — они вырастили кристалл в космосе: в условиях минимальной гравитации на Международной космической станции можно вырастить кристаллы гораздо лучшего качества.

**ЕСЛИ ЭТО СТРУКТУРА  
ПЕНИЦИЛЛИНА, Я БРОШУ ХИМИЮ  
И ПОЙДУ РАСТИТЬ ГРИБЫ**

Джон Корнфорт, британский химик, о (правильной) структуре, предложенной Ходжкин

## В сухом остатке: Устройство отдельных молекул

# 23 Электролиз

На рубеже XIX и XX веков изобрели аккумуляторные батареи, и химики принялись экспериментировать с электричеством. Вскоре появилась и новая методика под названием «электролиз» — с ее помощью можно было разъять вещество на части и открыть новые элементы. Электролиз стал и источником реактивов — хлора, например.

**В** 1875 году американский врач изобрел метод умерщвления волосяных луковиц и так начал избавлять своих пациентов от вросших ресниц. Он назвал это нововведение электролизом, и его до сих пор применяют для выведения нежелательных волос. Но депиляция все же имеет мало общего с передовым подходом, который применили в том же 1875 году для выделения нового серебристого металла — галлия. Объединяет их одно: как следует из названия, обе методики используют электричество.

К 1875 году этот второй тип электролиза уже существовал примерно полстолетия, если не больше, и успел совершить переворот в химии XIX века. И потому давайте никогда не будем путать электролиз, великий и ужасный, с методом перманентного удаления волос на ногах. Электролиз оказал мощное влияние и на здравоохранение, постепенно став главным методом извлечения хлора из рассола (хлор — дезинфицирующее средство, применяемое в бассейнах, а также при обработке питьевой воды, чтобы в ней не водилось ничего болезнетворного). Впрочем, в те времена электролиз был знаменит в первую очередь тем, что ученый и лектор Королевского института Гемфри Дэви (см. с. 44) применил его для выделения множества знакомых нам простых веществ, в том числе натрия, кальция и магния, из их соединений.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1800**

Первое описание  
аккумуляторной батареи  
Алессандро Вольта

**Конец 1800-х**

Николсон и Карлайл  
изобретают электролиз

**1892**

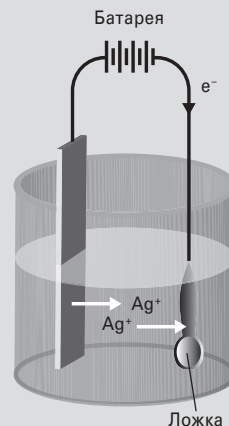
Электролиз применяется  
для промышленного  
производства хлора из рассола

## Золочение и серебрение

При покрытии серебром или золотом электролиз применяют для нанесения тонкого слоя драгоценных металлов на более распространенные. Металлический предмет при этом выступает в роли одного из электродов в электролитической ячейке. Можно посеребрить ложку, приделав к ней провод и батарейку, а затем погрузив ее в водный раствор цианидов серебра, допустим.

Ложка будет катодом, и положительно заряженные ионы серебра из раствора к ней потянутся. Чтобы поддерживать концентрацию ионов серебра, вместо анода используют кусок серебра.

В результате серебро перемещается с одного электрода на другой. Так же можно поступить и с золотом: приделать к нему провод и позолотить таким способом украшение или корпус мобильного телефона, к примеру. Раствор, в который погружают электроды, называется электролитом.



## ВОЗНЯ С ВОДОЙ

Хотя Дэви стал самым знаменитым экспериментатором с электролизом, лавры изобретения этого метода в 1800 году принадлежат малоизвестному химику по имени Уильям Николсон и его другу, хирургу Энтони Карлайлу. Их зачаровали эксперименты первоизобретателя батареи Алессандро Вольты, которые он завершил в том же году, и друзья пытались их повторить. В ту пору «батарея» Вольты (так называемый вольтов столб) представляла собой стопку металлических дисков, переложенных мокрыми тряпками, с приделанными ко всему этому проводами. Николсона и Карлайла заинтриговали пузырьки водорода, появившиеся в капле воды при контакте с батареей, и тогда они взяли провода и сунули их с разных концов в ванну с водой. На одном конце ванны поперли пузырьки кислорода, а на другом — водорода. Электричество разрушило связи внутри молекул воды и разложило ее на составляющие.

**1854**

Джон Сноу доказывает, что заболевания могут распространяться через воду

**1908**

Хлор впервые применяют для обеззараживания питьевой воды

Николсон состоялся как лектор, писатель и переводчик, у него уже был собственный популярный научный журнал, и он, не раздумывая, решил, где обнародует результаты своих экспериментов. «Журнал натурфилософии, химии и искусств», который поклонники именовали «Журналом Николсона», вскоре опубликовал статью, в которой провозгласил начало эры электрохимии.

## ЭЛЕКТРОХИМИЯ

Вольтов столб взяли в оборот и усовершенствовали, он постепенно стал походить на современную батарейку, и ученые вскоре уже применяли

**ВЕЛИЧАЙШИЙ ВОПРОС КАСАТЕЛЬНО  
РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДЫ... ПОЛУЧАЕТ  
МОЩНЫЙ ОТВЕТ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ,  
ВПЕРВЫЕ ПРОВЕДЕННЫХ ГОСПОДАМИ  
НИКОЛСОНОМ И КАРЛАЙЛОМ...**

Джон Босток (1773–1846),  
английский врач, геолог, естествоиспытатель,  
цитата из «Журнала Николсона»

электролиз во всякой интересной химии. Дэви выделил кальций, калий, магний и кое-какие другие простые вещества, а его шведский соперник Йенс Якоб Берцелиус исследовал расщепление разных солей, растворенных в воде. В химии соль — сложное вещество, состоящие из ионов, чьи заряды взаимно компенсируют друг друга. В поваренной соли (хлориде натрия) положительно заряжены ионы натрия, отрицатель-

но — хлора. Еще натрий, например, может образовывать ярко-желтую соль с хромат-ионами ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ). Эта соль, конечно, куда зрелищнее поваренной, зато хромат натрия ядовит и несъедобен.

Что подводит нас к современному пониманию того, как на самом деле устроен электролиз: все дело в ионах (см. «Ионы», с. 19). При растворении в воде соль разваливается (диссоциирует) на положительно и отрицательно заряженные ионы. В процессе электролиза эти ионы притягиваются к электродам с зарядом, противоположным тому, который на ионе. Электроны попадают в систему через катод, и положительно заряженные ионы серебра (см. с. 93), к примеру, присваивают эти электроны и оседают в виде серебряного покрытия, состоящего из нейтральных атомов. Отрицательные же ионы притягиваются к другому электроду (аноду), теряют на нем свои избыточные электроны и тоже нейтрализуют заряд.

Некоторые соли — та же поваренная, к примеру, — содержат ионы натрия, которые, хоть и заряжены положительно, как ионы серебра, более активны химически. И поэтому, когда ионы натрия откалываются от ионов хлора, они тут же соединяются с гидроксильными ионами ( $\text{OH}^-$ )

в воде и образуют гидроксид натрия. И потому катод притягивает не ионы натрия, а ионы водорода из воды, которые, получив недостающий электрон, выделяются в виде газа водорода.

### ЧИСТАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Такой же агрегат — основа целой отрасли производства хлора электролизом. По сути, пропусти электрический ток через морскую воду — и соберешь хлор. Побочный продукт, гидроксид натрия, также известный как каустическая сода, можно смешать с маслом и получить мыло.

Примерно в те же поры в XIX столетии, пока электролиз стремительно развивался, ученых все больше беспокоила одна напасть: распространение через воду различных заболеваний. Примерно до середины века считалось, что холера передается через вдыхание миазмов «дурного воздуха». При вспышке холеры в Лондоне в 1854 году, однако, Джон Сноу доказал, что люди заражаются от воды из колонки в Сохо: он отметил на карте случаи заболевания и тем самым заработал себе славу одного из первых эпидемиологов.

Через пару десятков лет хлор, получаемый электролизом, начали применять для обеззараживания питьевой воды и так защищать людей от микробов. Впервые этим способом обработали воду в Джерси-сити, Нью-Джерси, США. Хлор применяется и в отбеливателях, а также при производстве многих лекарств и инсектицидов. Ныне водородные пузырьки, образующиеся при электролизе соленой воды, иногда собирают и используют там же, на электролитическом производстве, как топливо для выработки дополнительного электричества.

### Электричество

Вольтов столб, изобретенный Алессандро Вольтой, обеспечил первый бесперебойный источник электричества. До этого для уловления и хранения электричества, получаемого из статических разрядов электрофорной машины с ручным приводом, применяли оклеенные оловянными листами лейденские банки. Банки эти заполняли водой или даже пивом и хранили в них электричество, пока ученые не поняли, что не в жидкости заряд копится, а в фольге.

**В сухом остатке:**

**Электричество  
расщепляет вещества**



# 24 Микротехнология

**В одном только вашем доме могут найтись десятки, если не сотни компьютерных чипов, и каждый из них — не только инженерное достижение, но и результат каких-либо значимых химических подвигов. Первые схемы на кремниевые подложки нанес именно химик, и, хотя ныне чипы куда миниатюрнее тех, что были созданы 50 лет назад, химия кремния — все та же.**

Мало какие разработки оказали столь же глубокое воздействие на человеческое общество, как изобретение кремниевого чипа. Нашими жизнями правят компьютеры, смартфоны и прорва других электронных устройств на микросхемах — чипах и микрочипах. Миниатюризация микросхем и приборов буквально рассовала нам компьютеры по карманам и повлияла на то, как мы ныне воспринимаем мир.

И все же об одном из ключевых прорывов в химии, который привел к развитию кремниевого чипа, мы склонны забывать. Хроники всякий раз воспевают Джека Килби из компании «Тексэс Инструментс», позднее получившего Нобелевскую премию по физике, как изобретателя микросхемы и постоянно поминают лаборатории «Белл», где изготовили первые транзисторы, а вот химика из «Белла» Карла Фроша и его помощника Линколна (Линка) Дерика часто удостоивают внимания лишь парой слов.

## **АСПИРАНТ-ПЕРВОГОДОК ФРОШ**

Быть может, все потому, что о Фроше мало что известно. Про его карьеру и личную жизнь написано совсем чуть-чуть. Научный талант в нем признали еще в юные годы — зернистый черно-белый снимок сумрачного 21-летнего Фроша есть в нью-йоркской «Шенектэди

## **СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1948**

Первый транзистор лабораторий «Белл»

**1954**

Карл Фрош и Линколн Дерик наращивают слой оксида кремния на кремниевой подложке

**1957**

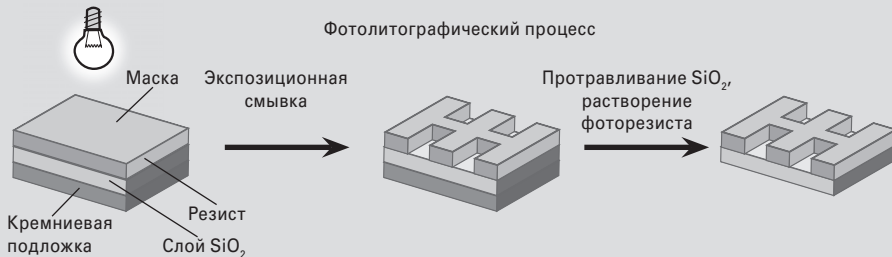
В «Белл» наносят рисунок на кремниевую поверхность с применением фоторезистов

Газетт» от 2 марта 1929 года, рядом с рекламой «Экстрамодной просеянной фасоли “Моуикэн”». Сопровождающая снимок заметка сообщает об избрании Фроша в почетное ученое братство «Сигма XI», а это — «высочайшая честь», какой может быть удостоен студент-естественник; но дальше лет десять — о нем полная тишина.

К 1943 году Фрош трудился в химических лабораториях Мёрри-Хилл, принадлежавших «Белл». Коллега Фроша Аллен Бортрэм вспоминает его как человека скромного, однако не без азарта, поскольку в июньском издании «Материалов лабораторий “Белл”» Фрош отмечился как призёр Лиги боулинга Мёрри-Хилл. Через пять лет лаборатории «Белл» презентовали свой первый транзистор, сделанный из германия. Крошечные версии этого миниатюрного электронного переключателя позднее станут частью компьютерных чипов, выпускаемых миллионами и миллиардами штук, но уже из кремния. Именно Фрош и Дерик, бывший летчик-истребитель, сделали открытие, подарившее Кремниевой долине ее название.

## Сотворение чипов

Одной из первых простеньких схем, нанесенных Фрошем на подложки, была надпись THE END («Конец»). Попросту говоря, процесс создания микросхемы или компьютерного чипа похож на печать, совмещенную с проявкой фотографии. Именно печатный метод, которым прежде рисовали микросхемы, позднее приспособили для прорисовки кремниевых подложек. Ныне на ту же кремниевую подложку можно наносить сложнейшие схемы и накладывать их в несколько слоев.



**1958**

Джек Килби из «Тексэс Инструментс» изобретает микросхему

**1965**

В журнале «Электроникс» опубликован закон Мура [Мора]

**2005**

Количество электрических компонентов в компьютерном чипе достигает миллиарда

## Легирование

У кремния на внешней электронной оболочке четыре электрона. В кристалле кремния каждый атом делится своими четырьмя электронами с четырьмя соседними атомами, итого получается по четыре общие пары на каждый атом. У фосфора пять электронов на внешней оболочке, и, если внести его как легирующую добавку, возникает один «свободный» электрон, который блуждает по кристаллу кремния и может переносить заряд. Таким легированием получают полупроводник *n*-типа, то есть заряд в нем переносят электроны. Есть и *p*-легирование — то есть положительными зарядами. В этом случае заряд переносится отсутствующими электронами. Странное это дело, но все же представим бор — *p*-легирующую добавку, — у которого на внешней оболочке на один электрон меньше, чем у кремния. Это значит, что возникло пустое место — электронная дырка в кристаллической структуре на том месте, где полагалось быть электрону.

## БЛЕСТЯЩИЕ ИДЕИ

К 1950-м годам транзисторы уже делали диффузионным методом: легирующую добавку — вещество, меняющее электрические свойства кремния, — вводили диффузией из газовой фазы в тончайшие германиевые или кремниевые подложки при очень высокой температуре. Микросхем к тому времени еще не придумали. В лабораториях «Белл» Фрош и Дерик возились с усовершенствованием диффузионного метода. Они уже перешли на кремний, поскольку в германиевых подложках то и дело возникали дефекты, но оборудование у изобретателей было так себе, и Фрош постоянно пережигал кремниевые подложки.

Подложку нужно было помещать в печь и обрабатывать струей водорода, содержащей легирующую добавку. Однажды Дерик пришел в лабораторию и увидел, что водородная струя, направленная на подложки, горит. Осмотрев образцы, он обнаружил, что они ярко блестят: в газовую смесь попал кислород, водород загорелся, получилась перегретый пар. Произошла реакция между кремнием и водяным паром, и на поверхности подложки образовался сте-

клянистый слой диоксида кремния. Этот самый слой ныне главная штука в фотолитографии, методе, и по сей день применяемом для создания кремниевых чипов.

## СМЫТЬ И ПОВТОРИТЬ

В фотолитографии узор микросхемы наносят на слой диоксида кремния. Его заранее покрывают фоторезистом — фоточувствительным слоем, а поверх него — маской, содержащей повторяющуюся схему, чтобы можно было сделать много чипов разом. Области фоторезиста, не скрытые маской, взаимодействуют со светом, и их можно смыть и проявить

перенесенную на подложку схему. И вот его как раз и наносят на блестящий слой диоксида кремния, который лежит ниже.

Фрош и Дерик поняли вот что: можно применять диоксид кремния для защиты подложки от разрушения при высоких температурах диффузионного процесса, а также выделять области, которые нужно легировать. Борные и фосфорные добавки не могут пробраться под оксидный слой, но, если процарапать в этом слое просветы, можно вводить добавки избирательно. В 1957 году Фрош и Дерик опубликовали статью в «Журнале электрохимического общества», в которой описали свои открытия и отметили потенциал этого метода для создания «точных рисунков на поверхностях».

Компании по производству полупроводников быстро переняли эту идею. Они пытались сделать много транзисторов из однослойных подложек. А год спустя Килби изобрел микросхему — устройство, в котором все составляющие были сделаны одновременно из одного образца полупроводникового материала. Тот «чип» был создан на основе германия, однако слой диоксида германия не сработал как барьер, и потому прижился кремний. Ныне перенос сложнейших схем, составленных с помощью компьютера, на кремниевые подложки происходит методом оксидной маски. В 1965 году основатель компании «Интел» Гордон Мор предсказал, что число компонентов компьютерного чипа будет удваиваться каждый год, но чуть погодя пересмотрел свой прогноз — каждые два года. Благодаря развитию фотолитографии мы идем вполне в графике и отметку в миллиард составляющих проскочили в 2005 году.

**КРЕМНИЙ КАК ТАКОВОЙ, РАЗУМЕЕТСЯ, НЕОБХОДИМАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ, А ЕЩЕ И ОКСИД ЕГО УНИКАЛЕН, И БЕЗ НЕГО В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МАЛО ЧТО ВООБЩЕ ЗАРОДИЛОСЬ БЫ**

Ник Холоньяк-мл. (р. 1928),  
американский инженер, ученый,  
изобретатель светодиода

**В сухом остатке:**

**Химия кремния  
в каждом смартфоне**

# 25

## Самосборка

Молекулы такие маленькие, что в обычные микроскопы их не видно, и ученые поэтому не имеют возможности применять к ним обычные методы. Зато они могут заставить молекулы самоорганизовываться. С помощью самосборных структур можно создавать малюсенькие приспособления и приборы, прямо-таки сошедшие со страниц научно-фантастических книг.

**Е**сли б вам понадобилось сделать себе ложку, вы бы как за это взялись? Что пришло бы вам на ум первым делом? Поискали бы кусок металла какой-нибудь или, может, ветку дерева и отбили бы или обтесали до нужной формы? Таков, вероятно, очевиднейший способ — но не единственный. Другой — возможно, поначалу он может показаться скучнее, — собрать много-много мелких кусочков металла или деревянных щепок и как-то соединить их между собой, чтобы получилась ложка.

Первый метод химики называют «подходом сверху». Берем кусок материала, убираем все лишнее и придаем ему нужную форму. Второй метод — противоположный, «подход снизу»: не усечением большого куска, а сборкой из маленьких. Такой способ вроде бы страшно трудоемкий, однако вообразите: не вам придется собственноручно эти кусочки сцеплять, а они сцепятся как надо сами. Все сразу упрощается.

### КАК ПО ВОЛШЕБСТВУ

Примерно это и происходит при молекулярной самоорганизации, только в очень маленьких масштабах. В природе ничего «сверху» не делается. Древесина, кость, паучье волокно — все эти материалы

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1955**

Самосборка вируса табачной мозаики в пробирке

**1983**

Первый самосборный монослой из молекул алкантиолов на поверхности золота

**1991**

Группа Надриана Симена создает самосборный куб из ДНК

созданы сами собой, молекула к молекуле. При образовании внешней мембраны клетки, например, частицы жиров, образующие мембрану, выстраиваются слоем, который окутывает всю клетку.

Если бы нам удалось разработать предметы, которые бы сами себя собирали, как в природе, «снизу», это было бы самое настоящее колдовство — как в фильмах про Гарри Поттера, когда довольно заклинания и взмаха волшебной палочки — и все встает на свои места. Мы бы могли создавать компьютерные чипы молекула к молекуле, такими крохотными, что удалось бы вместить вычислительную мощь всей НАСА в мобильный телефон — ну почти. Мы бы создавали медицинские машинки, способные проникать к нам в тело и там вычищать из артерий мусор, диагностировать рак или доставлять лекарство прямо к очагу инфекции.

Все это, может, и кажется чересчур сказочным, но кое-что из перечисленного уже происходит. В лабораториях по всему миру ученые предлагают все новые самосборные схемы, в которых частицы собираются вместе сами собой. Их либо приводят к месту назначения специальные матрицы или схемы, созданные более привычными методами «сверху», или же структуры, образования которых ждут от частиц вещества, заложены в самих частицах. Такие схемы — обыкновенно разработки нанотехнологов (см. с. 180). Самособирающиеся материалы можно применять при создании чрезвычайно тонких слоев специализированных покрытий, а также очень-преочень маленьких приборов. Материалы и структуры, которые создают нанотехнологи, невероятно малы, это масштабы одной миллионной миллиметра, и поэтому разумно собирать их именно

### Самосборные мономолекулярные слои

Эти слои толщиной в одну молекулу упорядочены по поверхности. Впервые самосборный мономолекулярный слой был получен в 1980-х — сначала из алкилсиланов, затем из алкантиолов. Сера в молекуле алкантиола имеет сильное сродство к золоту и золотой поверхности и потому «прилипает». Особо обустроив остальную часть органической молекулы, можно создавать тонкие пленки с различными химическими свойствами. К примеру, в такие пленки можно организовывать антитела или ДНК, и они будут полезны в медицинской диагностике.

**2006**

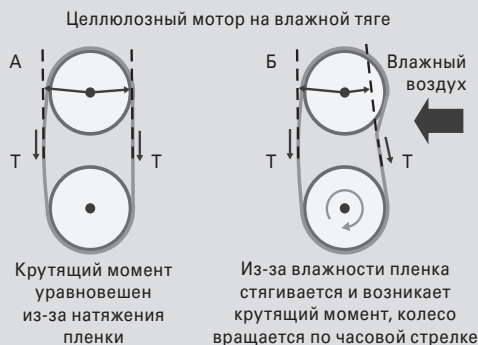
Пол Ротемунд сообщает о возможности сложить ДНК как оригами

**2013**

Британские исследователи разрабатывают тест на МРЗС, основанный на самосборном мономолекулярном слое, который распознает бактериальную ДНК

## Самосборка в жидких кристаллах

Молекулы в большинстве современных телевизоров находятся в жидкокристаллической фазе (см. с. 24), и в этой фазе есть некоторая упорядоченность в сочетании с текучестью, как у жидкостей. Молекулы сами собой организуются определенным образом, а приложение электрического поля этот порядок меняет, и мы видим меняющуюся картинку на экране. Ученые обнаружили много природных материалов, которые ведут себя как жидкие кристаллы и умеют самоорганизовываться. К примеру, вещества, из которых состоят жесткие ворсинки у некоторых насекомых и ракообразных, судя по всему, образуют жидкокристаллические самоорганизующиеся массивы. Новые способы управления самоорганизацией таких веществ могут оказаться интересными при создании передовых материалов. В одном исследовании 2012 года канадские ученые показали, что кристаллы целлюлозы, получающиеся из сосновой древесины, могут образовывать переливчатую пленку, в которой при переменных условиях освещения можно кодировать информацию. А еще из жидкокристаллической целлюлозы можно делать малюсенькие «паровые двигатели», работающие от влаги в воздухе. Влага меняет организацию кристаллов в целлюлозной пленке, из которой сделан приводной ремень, при этом ремень натягивается и тянет колесо, оно начинает вращаться.



молекула к молекуле и не применять инструменты прямо-таки исполинского размера.

## СКЛАДЫВАЕМ КАК ОРИГАМИ

Ясно, что нормальных размеров ложку таким способом собирать никто не будет, но, если бы потребовалась ложка наноразмеров, такой способ очень пригодился бы. Ученые из Гарвардского университета США пошли еще дальше. В 2010 году они сделали нечто, названное знаменитым химиком Уильямом Ши «маленькими швейцарскими ножиками» из самоорганизующихся молекул. Ученые подглядели, как это делается в природе: взяли нити ДНК (см. с. 140), которые сами умеют складываться в трехмерные структуры. Эти конструкции больше походят на маленькие каркасы для палатки, с распорками и растяжками невероятной силы и жесткости, а не на складные ножки. Ученые смогли точно определить нужное им устройство такой самосборной структуры путем создания особого шифра ДНК, чтобы молекулы гнулись и складывались лишь в определенных местах.

Это совсем не первый пример нанотехнологического решения с использованием ДНК: исследовательская группа воспользовалась

уже накопленным опытом в искусстве, именуемом «ДНК-оригами». И хотя никакого очевидного практического применения у молекулярных «палаток» нету, аналогия с оригами подсказывает, какие тут вообще могут быть богатые возможности. Один и тот же листок бумаги можно сложить в красивую птичку или в жалящего скорпиона — у ДНК те же способности принимать уйму разных форм; от исследователя требуется лишь правильно подобрать последовательность аминокислот.

**ЕСТЬ РАЗНИЦА: ПОСТРОИТЬ ЧТО-ТО В НАНОМАСШТАБАХ, МОЛЕКУЛА ЗА МОЛЕКУЛОЙ, ПРИМЕНЯЯ ПРИ ЭТОМ СООТВЕТСТВУЮЩИЙ НАНОПИНЦЕТ, — И ДАТЬ МОЛЕКУЛАМ ДЕЛАТЬ ТО, С ЧЕМ ОНИ ОТЛИЧНО СПРАВЛЯЮТСЯ, ТО ЕСТЬ САМООРГАНИЗОВЫВАТЬСЯ...**

Джон Пелеско (р. 1968),  
американский математик

Ши и его группа — биоинженеры. Они работают с биоматериалами и пытаются решать биологические задачи. Они вознамерились строить свои каркасные структуры внутри человеческого организма, благо это позволяет биологическая совместимость. Жесткость и прочность таких структур может оказаться полезной в восстановительной медицине, при починке или замене поврежденных тканей или органов: можно применять эти структуры как лабораторно произведенные из самой живой ткани строительные леса. Меж тем ученые-электронщики с помощью других подобных материалов собирают самоорганизующиеся схемы для крошечных датчиков и новых недорогих приборов.

## ИСКУССТВО В НАУКЕ

Как метод самосборка смахивает на волшебство, но чтобы заставить такие системы работать, нужен очень умелый ученый. Говоря строго, самосборка — это, в общем, даже не метод. Это нечто, происходящее уже после того, как все самое трудоемкое уже позади. Настоящее искусство — придумать такие молекулы, материалы и приборы, чтобы самосборка произошла. Ученые не ложки делают — они придумывают материалы, из которых ложки будут делаться сами.

## В сухом остатке:

## Самоорганизующиеся молекулы



У технологии «лаборатории на чипе» есть потенциал изменить медицину: можно не сходя с места и без всяких специальных навыков делать анализы чего угодно — от пищевых примесей до вируса Эбола в крови. С помощью одного малюсенького чипа уже можно проводить сотни экспериментов, и такой прибор поместится у вас в кармане.

**П**риходите вы к врачу с какой-то неведомой хворью в животе и наверняка надеетесь не услышать вот это ужасное: «Нужен образец кала». Да, каждому из нас, вероятно, приходилось собирать в баночку собственные испражнения и тащить их в поликлинику. К счастью, эту баночку у вас сразу отбирают и уносят в лабораторию и вам больше никогда не придется на нее смотреть. А в не таком уж далеком будущем врач сможет проанализировать ваш образец прямо при вас и через 15 минут выдать результат.

В 2006 году американские исследователи из проекта, профинансированного Национальными институтами здравоохранения, сообщили, что разрабатывают «одноразовые энтерокарточки», способные отличить кишечную палочку от сальмонеллы посредством нескольких параллельно проходящих анализов образца кала, и все это — на одном-единственном микрочипе. Этот прибор обнаруживает молекулы на поверхности микроба при помощи антител, собирает их и анализирует их ДНК.

Все с виду ловко — и немножко тошнотворно. Но такие «энтерокарточки» — не единственный пример: за так называемыми тестами на месте — возможное будущее медицины, и многие из них — та самая «лаборатория на чипе». Уже есть приборы для диагностики инфаркта

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1992	1995	1996
Микрочиповая технология применена для создания микроустройств для разделения молекул в крошечных стеклянных капиллярах	Первое использование микроустройства для секвенирования ДНК	При помощи чипа определена ДНК сальмонеллы

и контроля концентрации Т-клеток у носителей ВИЧ. Дешевые диагностические чипы могут однажды сыграть ключевую роль в отслеживании распространения эпидемий. Громадный плюс в применении таких чипов в том, что они для неспециалистов, это автоматический эксперимент, происходящий у вас на ладони. Врачу нужно лишь ввести в такую машинку образец вашего биоматериала и вставить карточку в распознающее устройство.

### МИКРОЧИП ПЛЮС ДНК

Понятие «лаборатория на чипе» возникло, когда ученые начали понимать, что могут прикарманить привычные методики создания микрочипов (см. с. 96) и с их помощью делать миниатюризованные версии типовых лабораторных экспериментов. В 1992 году швейцарские исследователи показали, что на чиповом устройстве можно осуществить привычную процедуру разделения — капиллярный электрофорез (см. с. 82). К 2004 году химик Эдам Вулли с коллегами из Калифорнийского университета, Беркли, США, уже отделял ДНК по тончайшим канальцам на стеклянном чипе, а вскоре они применили чипы при секвенировании ДНК, в наши дни эта методика стала важнейшим применением технологии «лаборатория на чипе», и такие чипы способны обработать сотни образцов параллельно и за считанные минуты выдать результат.

Секвенирование на чипе — это вам не баран чихнул. Обычно его проводят полимеразной цепной реакцией (ПЦР), которую в молекулярной биологии применяют уже много лет. Эта реакция требует попеременного нагревания и охлаждения ДНК. Чтобы такое получилось на чипе, образцы в канальцах необходимо нагревать или пропихивать через последовательность реакционных ячеек, каждая объемом менее одной тысячной миллилитра, при разных температурах. Одно из важнейших направлений развития технологии «лаборатория на чипе» — микрогидродинамика, то есть работа с крошечными объемами жидкости.

### Детективная работа

Быстрый чиповый химический анализ мог бы принести пользу в расследовании темных делишек — к примеру, при тестировании паленых лекарств или обнаружении вредительски подмешанных в пищу веществ. «Лаборатория на чипе» могла бы делать анализы многих нелегальных препаратов или же — в спорте — допингов и выдавать результат за несколько минут.

**1997**

Параллельное секвенирование ДНК на одном микрочипе

**2012**

Прогноз появления технологии «лаборатория в смартфоне» для медицинского мониторинга

**2014**

Предложена концепция «интернета жизни»

## Интернет жизни

Вы, вероятно, слышали про «интернет вещей» — понятие, основанное на представлении, что все мы живем в мире стремительно умнеющих приборов, которые можно объединить между собой в одну сеть. Смартфоны, холодильники, телевизоры и даже чипированных собак можно включить в одну сеть — через их микрочипы. Исследователи из компании «КвантуМДэкс» из Ньюкасла-на-Тайне, Англия, планируют создание «интернета жизни», который объединит сведения, получаемые на приборах «лаборатория на чипе» по всему миру. Ученые считают, что данные секвенирования ДНК, собранные чиповыми устройствами, можно локализовать географически, то есть привязать к конкретному месту на глобусе. Это позволит эпидемиологам располагать невероятно подробными данными о распространении болезней в режиме реального времени. Так можно мониторить малярию, отслеживать эволюцию вируса гриппа, помогать прогнозировать вспышки Эболы, определять новые устойчивые к воздействию лекарств штаммы туберкулеза и, есть надежда, применять эти сведения для пресечения эпидемий.



У чипа есть, впрочем, и много других применений. С точки зрения химика, каналца и ячейки в чипе дают возможность проводить реакции и анализы контролируемо и воспроизводимо, а также — с образцами, слишком мелкими для человеческих рук. Биологи могут залучить даже отдельную клетку в такие реакционные ячейки и посмотреть, как на нее действуют различные вещества и биологические сигнальные молекулы одновременно. Разработчики лекарств могли бы применять их, чтобы смешивать мизерные количества различных лекарств и смотреть на результат их совместного действия. Во всех этих областях работа с мельчайшими объемами дает возможность свести отходы и стоимость процессов к минимуму.

Чипы могли бы принести пользу при составлении лекарств и их точном введении в организм — созданием микро- и нанокapsул или подачей точно отмеренным постоянным потоком в режиме капельницы, минимальными дозами, что уменьшило бы побочные эффекты, связанные с внезапным

скачком концентрации вещества в организме. Некоторые эксперты предсказывают, что пациенты смогут носить при себе портативные чипы-дозаторы. Их можно даже соединить непосредственно с тканями, которым предназначено лекарство, через «микроиглу» — например, возле опухоли.

## СЕТЬ ДАННЫХ О БОЛЕЗНЯХ

Диагностика и мониторинг здоровья людей, впрочем, едва ли не самая интересная область развития «лабораторий на чипе». Чаще всего при помощи чиповых приборов анализируют белки, нуклеиновые кислоты типа ДНК или же молекулы, участвующие в метаболизме. Очевидна польза чиповых приборов для диабетиков, которым приходится постоянно следить за уровнем сахара в крови (см. «Следим за сахаром», с. 136). Есть и так называемые биомаркерные белки, по которым судят о многих изменениях в состоянии организма, от травмы мозга до начала родов. Зачастую в диагностических чипах применяют антитела, поскольку они хорошо распознают некоторые специфические молекулы — и наши собственные, и принадлежащие инфекционным организмам.

Чиповая диагностика могла бы принести большую пользу в тех уголках мира, где не хватает ресурсов и учреждений с профессиональным лабораторным анализом. Одна британская компания хочет ввести результаты, полученные на их диагностических приборах, в сетевую базу данных и создать этот самый «интернет жизни», который мог бы мониторить вспышки смертельно опасных заболеваний типа Эболы. И пусть пройдет еще несколько лет, прежде чем врач сможет проделать анализ вашего кала не сходя с места, — «лаборатории на чипе» однажды могут произвести революцию в нашем отношении к болезням и их лечению. И, как мы еще узнаем, компьютерная мощь применяется много где еще в химии.

**В НАШИ ДНИ ЕСТЬ МНОГО ТАКОГО, ЧТО ДЕЛАЕТСЯ БЕЗ УЧАСТИЯ ТРАДИЦИОННОГО ВРАЧА... РЕЧЬ О ЛАБОРАТОРИЯХ НА ЧИПЕ, В ТЕЛЕФОНЕ...**

Эрик Топол (р. 1954),  
американский кардиолог, генетик, директор  
Междисциплинарного института Скриппса,  
из подкаста «Клиническая химия»

## В сухом остатке: Химический анализ в миниатюре

# 27

## Вычислительная химия

Мартин Карплус, любитель птиц, в душе — биолог, вроде бы не самый очевидный кандидат в отцы вычислительной химии. Однако он считал, что теоретическая химия может указать путь к пониманию жизни в целом, и так оно и оказалось; Карплусу нужно было лишь дождаться, когда древние пятитонные компьютеры эволюционируют до современных.

**М**артин Карплус, отец вычислительной химии, — австрийский еврей, чья семья уехала из Австрии в США в 1938 году, сразу после аншлюса страны нацистами. В американской школе в Карплусе распознали талант. Вне школы он активно увлекался наукой, а попутно в нем росла страсть к природе. Он сделался юным птицелюбом и записывал места гнездования для ежегодного исследования миграции птиц, проводимого Одюбоновским обществом. В 14 лет его чуть не арестовали по подозрению, что он немецкий шпион и подает сигналы подводным лодкам: Карплус прогуливался в грозу с биноклем — высматривал малых гагарок.

Перед поступлением в колледж Карплус принял приглашение поучаствовать в исследовании навигации у птиц на Аляске и убедился, что карьера ученого — это по нему. И все же записался не в биологи, а на программу по химии и физике в Гарварде, сочтя, что эти предметы потребуются ему для понимания биологии и жизни в целом. В аспирантуре в Калтехе он взялся за исследование белков, однако наставник Карплуса бросил, и им занялся Лайнус Полинг, будущий нобелевский лауреат по химии (за работы в изучении химической

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1959**

Опубликована исходная формулировка уравнения Карплуса

**1971**

Карплус с коллегами обнародует теорию ретиналя

## Компьютеры и разработка лекарств

Чтобы выяснить, работает ли новое лекарство как должно, его необходимо опробовать. Однако проверить действие сотен и тысяч потенциальных новых препаратов на живых клетках, животных или людях невозможно: ресурсы сил и средств ограничены. И вот тут-то пригождается вычислительная химия. Молекулярное моделирование позволяет разобраться, как молекулы лекарства могут взаимодействовать с теми молекулами в организме, на которые лекарство нацелено, и так понять, какой из составов препарата лучше прочих управляется с болезнью. Такие теоретические расчеты можно считать экспериментами *in silico* — в кремнии, то есть в компьютере. Конечно, есть такие задачи при разработке лекарств, с которыми моделированием не обойдешься, но именно

поэтому хорош метод сочетания вычислительной (теоретической) и экспериментальной химии.



Прогноз белковой структуры, полученный компьютерно, по сравнению с результатом, полученным рентгеновским методом

связи). Карплус исследовал водородные связи (см. с. 20) и, когда Полинг внезапно объявил, что собирается в долгосрочную поездку, вынужден был писать диссертацию за три недели.

Поработав некоторое время в группе теоретической химии в Оксфордском университете, Карплус пять лет служил в университете Иллинойса — занимался ядерным магнитным резонансом (ЯМР, см. с. 84). Этим методом он изучал углы между связями атомов водорода в молекуле этанола ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ); тогда-то он и понял, что производить все вычисления на калькуляторе — штука страшно занудная, и написал компьютерную программу, чтоб считала за него сама.

**1977**

Первая динамическая модель крупной биомолекулы — ингибитора трипсина поджелудочной железы быка

**2013**

Мартин Карплус, Майкл Левитт и Арье Варшель удостоены Нобелевской премии за развитие вычислительной химии

**ХИМИКИ-ТЕОРЕТИКИ СКЛОННЫ  
ВОЛЬНО УПОТРЕБЛЯТЬ ПОНЯТИЕ  
«ПРЕДСКАЗАНИЕ» И ОПИСЫВАТЬ ИМ  
ЛЮБЫЕ РАСЧЕТЫ, СОГЛАСУЮЩИЕСЯ  
С ЭКСПЕРИМЕНТОМ, ДАЖЕ ЕСЛИ ЭКСПЕ-  
РИМЕНТ СЛУЧИЛСЯ ДО РАСЧЕТОВ**

Мартин Карплус (р. 1930)

### ПЯТИТОННЫЙ КОМПЬЮТЕР

В те времена — в 1958 году — университет Иллинойса был гордым обладателем пятитонного цифрового компьютера по имени ИЛЛИАК, у которого было целых 64 КБ памяти, которых недостаточно даже для одного фотоснимка, сделанного вашим мобильным телефоном, но сгодились для Карплусовой

программы, а программирование осуществлялось при помощи перфокарт. Вскоре после завершения расчетов Карплус посетил лекцию одного химика-органика из того же университета, и оказалось, что полученные расчетные данные вроде бы согласуются с экспериментом.

Убедившись, что расчеты могут быть полезны при определении химических структур, Карплус опубликовал статью, включив в нее математическое выражение, позднее ставшее известным как уравнение Карплуса. Это уравнение помогает химикам расшифровывать результатов ЯМР-спектроскопии и определять устройство органических молекул. Исходную формулировку уравнения позднее уточнили и доработали, но его по-прежнему применяют в ЯМР-спектроскопии. Лекция, на которой побывал Карплус, была по сахарам, однако его уравнение применимо и к другим органическим молекулам, включая белки, а также к неорганическим веществам.

В 1960 году Карплус перебрался в Уотсоновскую научную лабораторию, которую финансировала IBM и снабдила ее своими компьютерами, более быстродействующими и с большим объемом памяти, чем ИЛЛИАК. Быстро поняв, что карьера технолога не для него, Карплус вернулся в научную среду, но обзавелся кое-чем полезным для своей исследовательской работы: доступом к IBM-650. Он продолжил решать задачи, которые увлекли его еще в Иллинойсе, но теперь у него были инструменты, чтобы взяться за дело всерьез, и компьютер помог ему заняться исследованием реакций на молекулярном уровне.

### НАЗАД К ПРИРОДЕ

Позднее Карплус вернулся в Гарвард, к своей первой любви — биологии. Он применил накопленный опыт теоретической химии к выяснению устройства зрения у животных. Карплус с коллегами предположил, что одна из углерод-углеродных связей в ретинале — форме витамина А, которая улавливает свет, попадающий в глаз, — переключается под действием

света, и что это движение для зрения — ключевое. Теоретические расчеты предсказали изменение в структуре молекулы, которое происходит из-за такого скручивания. В тот же год расчеты подтвердились экспериментально.

Теоретические результаты вычислительной химии частенько получают параллельно эмпирическим свидетельствам. Теория подкрепляет наблюдения, а наблюдения, в свою очередь, поддерживают теорию. Такие совместные результаты получаются гораздо более достоверными. После того как Макс Перуц установил кристаллическую структуру гемоглобина — переносящую кислород молекулу в составе крови, — Карплус создал теоретическую модель и с ее помощью объяснил, как кровь связывает кислород.

### ДИНАМИЧЕСКАЯ ОБЛАСТЬ

Карплус далее взялся изучать, как белковые цепочки складываются и образуют рабочие молекулы, и со своим учеником Брюсом Гелином он разработал программу, помогающую обчислять белковые структуры по их аминокислотным последовательностям и результатам рентгеноструктурного анализа (см. с. 88). Результат их работы, «Программа CHARMM» («Химия Гарвардской макромолекулярной механики»), по-прежнему значим в этой сфере исследования.

Моделирование в современной химии почти так же важно, как в экономике. Химики разрабатывают компьютерные модели, способные воссоздавать на атомном уровне реакции и процессы вроде свертывания белковых цепочек. Эти модели применимы к процессам, которые почти невозможно увидеть в действии, поскольку происходят они за доли секунды.

### В сухом остатке:

## Моделируем молекулы на компьютере

### Союз биологии, химии... и физики

Мартину Карплусу пришлось учить не только химию, чтобы объяснить биологию, но и соединить знание химии и физики. Нобелевская премия по химии, которую Карплус и его коллеги получили в 2013 году (см. с. 109), досталась им за применение и классической, и квантовой физики при разработке мощных моделей, которые позволяют химикам обчислять структуры крупных биологических молекул.



# 28 Углерод

**Углерод — химический элемент, на который валят вину за загрязнение окружающей среды. При этом углерод — основа жизни на Земле: все когда-либо жившее состояло из углеродсодержащих веществ. Как вышло, что какой-то маленький атом проник во все уголки целой планеты? И почему два вещества, содержащие исключительно углерод, выглядят настолько по-разному?**

**Н** и о каком другом элементе не слышим мы так часто. И слышим мы преимущественно всякие гадости, конечно: углерод загаживает атмосферу, портит климат на Земле... Постоянный фокус внимания на сдерживании углеродного выброса означает, что углерод нам представляется как сила, которую необходимо обуздать. И потому легко забыть, что углерод сам по себе всего лишь тугой сгусток протонов и нейтронов, окруженный облаком из шести электронов. Простой химический элемент, расположенный в таблице Менделеева над кремнием. Так что же, помимо его экологического хулиганства, такого важного есть в углероде, что он заслуживает специального отношения?

Мы иногда забываем о том, что углерод — основа всего живого на Земле, всего, что шныряет, ползает, плещется и летает. Именно углерод — хребет любой биомолекулы, от ДНК до белков, от жиров до нейропередатчиков между синапсами и мозгом. Если пересчитать все атомы в вашем организме, более одной шестой этого количества — углерод. Больше только кислорода, потому что тела наши в основном состоят из воды.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1754**

Джозеф Блэк выделяет диоксид углерода

**1789**

Антуан Лоран Лавуазье предлагает название элемента — «карбон» (углерод)

**1895**

Сванте Аррениус публикует статью о поведении углерода в атмосфере

## ОРГАНИКА И НЕОРГАНИКА

Чрезвычайное разнообразие углеродсодержащих веществ обусловлено готовностью углерода образовывать связи с самим собой, а также с другими атомами и формировать кольца, цепи и другие более затейливые структуры. Природа сама по себе способна создавать миллионы различных сложных углеродных соединений. Многие, вероятно, исчезнут еще до того, как мы успеем их открыть, поскольку вымрут растения, животные, насекомые и прочие существа, умеющие их синтезировать. А с учетом человеческой изобретательности возможности для полностью искусственного создания новых углеродсодержащих веществ буквально безграничны.

Все эти вещества — поле исследования органической химии. Ярлык «органика» может ввести вас в заблуждение, что все эти вещества есть в природе, и поначалу органической химией называли именно науку о природных веществах. Однако в наши дни мы считаем пластмассы органическими веществами в той же мере, в какой относим к ним белки, поскольку и те и другие имеют углеродный скелет. Почти все углеродсодержащие вещества, за несколькими примечательными исключениями, — органические, независимо от того, сотворены они внутри свеклы, внутри бактерии или внутри лабораторной посуды.

В целом все, что не органика, — неорганика. Подобно органической химии, у неорганической есть свои разделы, но в самом делении химии содержится знак важности углерода. Один из самых очевидных изгоев — вещество, засоряющее нам атмосферу, диоксид углерода (углекислый газ). Он, вообще-то, ни под какую категорию химии не подходит. Хотя в нем содержится углерод, у него нет того, что химики именуют функциональными группами. Большинство органических веществ можно подробно классифицировать на основании групп атомов, которыми обвешаны углеродные скелеты их молекул. Но поскольку диоксид углерода располагает лишь двумя атомами кислорода, он оказался в промежуточном пространстве классификаций.

**1985**

Лабораторно синтезирован бакминстерфуллерен («бакибол»)

**2009**

110 мировых лидеров собираются в Копенгагене на дискуссию о климате и действиях, которые необходимо предпринять из-за его изменений

**2010**

Нобелевская премия по физике вручена за получение графена из графита

Есть целый класс исключений из приведенной классификации — металлоорганика. Существуют углеродсодержащие вещества, в которых отдельные атомы связаны с атомами металлов. Металлоорганические вещества считают средним между органикой и неорганикой, и чаще ими занимаются химики-неорганики. Ничего сверхъестественного или загадочного в этих веществах нет, и делаются они не только в лабораториях. Молекулы гемоглобина, переносящие кислород в крови, имеют в своем составе атомы железа, а витамин  $B_{12}$  — кобальт (см. с. 48). Подобно  $B_{12}$ , металлоорганические вещества — обычно хорошие катализаторы.

**НЕБОЛЬШОЕ ПРИСУТСТВИЕ  
УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ,  
ОБУСЛОВЛЕННОЕ РАЗВИТИЕМ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ, В БЛИЖАЙ-  
ШИЕ НЕСКОЛЬКО СТОЛЕТИЙ  
ЗАМЕТНО УВЕЛИЧИТСЯ**

Сванте Август Аррениус (1859–1927),  
шведский химик, в 1904 году

### СУГУБО УГЛЕРОДНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Вот еще одно странное углеродное вещество — алмаз. Он весь сплошь углерод, но органикой не считается. (Иногда лучше принять систему химической классификации на веру.) Есть и другие поразительные вещества, состоящие исключительно из углерода, с которыми есть смысл познакомиться поближе. Помимо алмаза существуют еще и углеродное волокно, углеродные нанотрубки, бакминстерфуллерены, карандашный грифель (графит) и устроенное,

как проволоочная сетка, со слоями в один атом толщиной, углеродное вещество под названием графен, на который возлагают большие надежды в области электроники (см. с. 184).

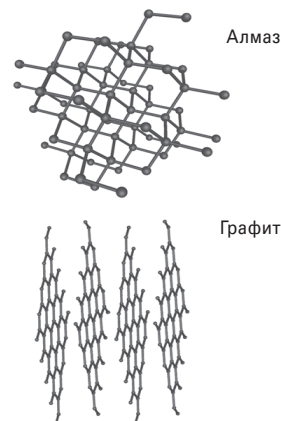
Странно тут вот что: алмаз и карандашный грифель вообще друг на друга не похожи. Оба полностью состоят из углеродных атомов, которые просто организованы по-разному. Результат разницы в устройстве — совершенно разные внешний вид и свойства. А графен вот не слишком отличается по структуре от графита. Можно даже взять скотч и снять мономолекулярный слой углерода с куска графита.

### НЕУКРОТИМЫЙ УГЛЕРОД

Из-за всей этой интересной и полезной химии мы держим углерод на коротком поводке. Точнее, это он нас держит. Ископаемое топливо, которое мы жжем ради энергии, — углеводороды, а когда эти вещества (и уголь) горят, реакция горения производит диоксид углерода. Так углерод, заточенный под землю на миллионы лет, уже давно попадает в атмосферу, где углекислый газ не дает инфракрасному излучению улетать в космос,

## Алмазы и грифель

В алмазе каждый атом углерода связан с четырьмя другими, а в графите — лишь с тремя. Связи в алмазе простираются во все стороны, а в графите — в пределах одной плоскости. Это значит, что структура алмаза — жесткая, трехмерная, а графит образован из слабо связанных друг с другом слоев. Эти слои сцепляются ван-дер-ваальсовыми силами, но это слабая сцепка, и рвется она легко: довольно прижать карандаш к бумаге и потащить его — вот и снялись верхние слои. Из-за такого устройства на уровне атомов алмаз очень твердый, а графит, наоборот, очень мягкий.



и возникает так называемый парниковый эффект, из-за чего происходит глобальное потепление. Независимо от того, что углерод значит для нашего организма или практического применения простых карандашей — или же в потенциально возможных электронных устройствах будущего, — мы ежегодно выпускаем в атмосферу миллиарды тонн диоксида углерода, а это по-прежнему наша большая беда.

**В сухом остатке:**

**Многоликий элемент**

# 29 Вода

Вы бы, может, никогда и не подумали, что у воды могут быть какие-то тайны, — вы же ее, во всяком случае, насквозь видите, но есть у воды скрытые глубины: углеродсодержащие вещества — суть жизни, а вода — среда, в которой жизнь зарождается и процветает. И все-таки даже десятилетия изучения ее структуры не подарили нам модели, которая могла бы в точности описать, как именно вода поведет себя в той или иной ситуации — и почему.

**Н**<sub>2</sub>O — единственная химическая формула, помимо CO<sub>2</sub>, которую большинство людей вспомнят, не задумавшись ни на секунду. Проще некуда, все понятно? Однако то, что льется у нас из кранов, заполняет наши формочки для льда и из-за чего у нас в бассейнах и прудах мокро, — штука далеко не простая, как оказалось. Пусть вода и мыслится нам скорее фоном на отпускных фотокарточках, а не веществом, она в самом деле именно вещество — и ой какое мудреное.

**ВЕЛИЧАЙШАЯ ТАЙНА НАУКИ — ПОНИМАНИЕ, ПОЧЕМУ, ПОСЛЕ БЕЗ ПРЕУВЕЛИЧЕНИЯ ВЕКОВ НЕУСТАННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ, МЫ ПО-ПРЕЖНЕМУ НЕ В СИЛАХ ТОЧНО ОПИСАТЬ И ПРЕДСКАЗАТЬ СВОЙСТВА ВОДЫ**

Ричард Сэйкэлли (р. 1947),  
американский химик

К примеру, если вы считали, что вода бывает лишь трех разных видов — лед, жидкость и пар, — вы заблуждались. Некоторые модели показывают, что у воды — две разные жидкие фазы (см. с. 24) и целых двадцать фазовых разновидностей льда. Есть много такого, чего мы о воде не знаем, но начнем с того, что нам все-таки известно.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**VI в. до н.э.**

Греческий философ Фалес Милетский называет воду источником всей жизни

**1781**

Генри Кавендиш [Хенри Кэвендиш] устанавливает химический состав воды

**1884**

Первое предположение о кластерном устройстве воды

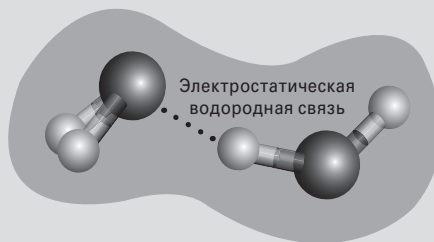
## ПОЧЕМУ ВОДА НЕОБХОДИМА ДЛЯ ЖИЗНИ

Вода — она всюду. Американский химик, специалист по химии воды Ричард Сэйкэлли любит напоминать, что вода — третье по распространенности вещество во Вселенной. Она покрывает почти три четверти поверхности нашей планеты, и если вы когда-нибудь услышите про то, как астрономы с большим упорством ищут воду на Марсе (см. с. 124), знайте: им важно отыскать место в космосе, где есть вода, потому что вода неимоверно важна для жизни. Особенно жидкая. Именно благодаря уникальным химическим и физическим свойствам вода — идеальная жидкость для жизни в ней и для неотъемлемых от жизни химических реакций.

Перво-наперво, жидкая вода — великолепный растворитель: она растворяет практически все, и многие из растворимых в ней веществ нужны именно в растворенном виде, иначе они не участвуют в реакциях. Благодаря этому свойству вещества у нас в клетках вступают во взаимодействия и обеспечивают метаболические процессы. А еще вода перемещает вещества внутри клетки и по всему организму и остается жидкой в необычайно широком по сравнению с другими соединениями диапазоне температур.

## Влияние воды на изменение климата

Совсем недавно физики из Нижегородского отделения Российской академии наук приблизились к разгадке одной из тайн, которая не давала покоя исследователям атмосферы планеты. Вода, похоже, поглощает гораздо больше излучения, чем должна бы в соответствии с теоретическими моделями, основанными на ее структуре. Разницу между прогнозируемыми и реальными величинами можно было бы объяснить присутствием димеров — спаренных молекул воды — в атмосфере, но доказать это экспериментально пока не удалось. В попытке поймать неуловимые димеры Михаил Третьяков и его коллеги даже изобрели специальный спектрометр. Результаты показали, что происходящая абсорбция излучения и впрямь может означать присутствие димеров, и это могло бы подсказать нам, как именно вода влияет на поглощение ИК-излучения в атмосфере.



Модель димера воды

**1975**

Бутрон и Албен обнаруживают модель с кольцеобразными структурами в жидкой воде

**2003**

Космический аппарат НАСА обнаруживает обширные запасы водяного льда на Марсе

**2013**

Новые доказательства образования димеров воды в атмосфере Земли

## Жизнь без воды

Мы привыкли думать, что жизнь зависит от воды. Но так ли это? Раньше полагали, что белкам — молекулам, из которых состоят ферменты и более сложные системы в нашем организме (мышцы, например), — вода необходима для сохранения нужного устройства и выполнения их задач. Однако в 2012 году ученые из университета Бристоля (Англия) поняли, что миоглобин, белок, связывающий кислород в мышцах, сохраняет свою структуру и в безводных условиях, а также, что любопытно, делается чрезвычайно устойчив к нагреванию.

Может показаться очевидным, что вода замерзает при  $0^{\circ}\text{C}$  и кипит при  $100^{\circ}\text{C}$ , но мало какие еще вещества остаются в жидкой фазе при таком разбросе температур. Аммиак, к примеру, замерзает при  $-78^{\circ}\text{C}$ , а кипит при  $-33^{\circ}\text{C}$ , остальные же наличные в природе вещества при температурах, пригодных для жизни на Земле, в основном даже не переходят в жидкую фазу.

Еще одно ценное качество воды состоит в том, что она плотнее в жидком состоянии, чем в твердом — из-за особой компоновки молекул воды в твердом состоянии; именно поэтому лед плавает. Вообразите, какой вышел бы кавардак на планете, если бы айсберги тонули.

## ЧТО ЕЩЕ МЫ ЗНАЕМ О ВОДЕ

Молекулы воды слегка изогнуты, наподобие бумеранга, и они очень-очень маленькие даже по сравнению с другими простачками вроде

$\text{CO}_2$  или  $\text{O}_2$ , а это значит, что таких молекул в маленький объем можно напихать уйму. Литровая бутылка содержит около 33 септильонов молекул воды — это 33 с двадцатью четырьмя нулями. По некоторым оценкам, это в три с лишним раза больше, чем звезд во Вселенной. Плотная упаковка плюс водородные связи, возникающие между атомами кислорода одной молекулы и водородными атомами других (см. с. 20), — вот что не дает молекулам воды разлетаться во все стороны, и поэтому вода обыкновенно жидкая, а не газообразная.

Все это не означает, что все молекулы в жидкой воде замерли на месте, — вовсе нет. Вода динамична. Водородные связи, скрепляющие между собой молекулы, рвутся и образуются заново триллионы раз в секунду, и времени для образования грозди молекул не остается совсем — такие грозди распадаются, не успев собраться. Напротив, испарение молекул воды происходит довольно «редко», то есть всего 100 миллионов раз в секунду с каждого квадратного нанометра поверхности.

**НЕЧТО ПЕРВОРОДНОЕ ЕСТЬ ВСЕГДА,  
И ПОТОМУ НИЧТО НЕ СОЗДАЕТСЯ И НЕ РАЗРУШАЕТСЯ...  
ФАЛЕС ГОВОРIT, ЧТО ЭТО ПЕРВОРОДНОЕ — ВОДА**

Аристотель (384 до н. э. — 322 до н. э.),  
древнегреческий философ, из «Метафизики»

## **ЧЕГО МЫ О ВОДЕ НЕ ЗНАЕМ**

Нам о воде известно много чего, однако еще больше нам неведомо. Вот, к примеру, редкость испарения, которая требует разрыва водородных связей, чтобы молекула могла оторваться от поверхности, — это явление мы пока толком не поняли. Нам мало знания, что такой отрыв происходит редко. Вопреки нашим обширным новейшим техническим возможностям, которые мы применяем для изучения структуры воды, эти вот кластеры — то они есть, то нету их — тоже штука не очень понятная. Само существование этих кластеров под вопросом. Если они существуют столь мимолетно, как они тогда образуют нечто, именуемое нами структурой?

Уже были предложены сотни различных моделей, пытающихся отразить структуру воды, но ни одна не описывает поведения этого вещества во всем его разнообразии и в любых условиях. Не первое десятилетие исследовательские группы по всему миру, включая Ричарда Сэйкэлли с коллегами в Национальной лаборатории имени Лоренса в Беркли, старательно пытаются решить эту невероятно сложную задачу. Группа Сэйкэлли применяет мощнейшие и сложнейшие спектроскопические методы, а также квантово-механические модели — все ради того, чтобы объяснить свойства этой крохотной молекулы, от которой зависит вся существующая жизнь.

**В сухом остатке:  
В тихом омуте многое водится**



# Происхождение жизни

Происхождение жизни на Земле занимало умы ученых и мыслителей — от Чарлза Дарвина до современных химиков. Всем хочется знать, как началась жизнь на планете, но на самом деле довольно трудно ответить на этот вопрос однозначно. Впрочем, в таких раздумьях все равно есть смысл: вдруг удастся понять, каковы минимальные критерии создания искусственной жизни в лаборатории.

**Ч**етыре миллиарда лет назад кое-какие вещества сбились в кучу и получилась протоклетка. Где это произошло — тема для обсуждения: может, у дна океана, может, в теплом вулканическом озере, а может, на припорошенной пеной заболоченных просторах или — если вы верите в теорию панспермии — вообще на другой планете. Место — штука значимая, но пока это все еще предмет спекуляций.

В наши дни все живое появляется из другого живого: звери рожают, растения сыплют семенами, бактерии делятся, дрожжи почкуются. Но самые первые формы жизни должны были получиться не из живого, а в результате удачного сочетания просто каких-то химических веществ. Первая клетка была, видимо, очень неприятной по сравнению с современной человеческой или даже бактериальной. Может, то был просто кулек с веществами, которые совместно устроили некое подобие метаболизма. Какая-то самовоспроизводящаяся молекула тоже должна была присутствовать — чтобы передать данные о новообразовавшейся клетке ее потомкам. Так, по-видимому, зародился примитивный генетический код, но и близко не такой сложный, как ДНК (см. с. 140).

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1871**

Дарвин выдвигает предположение, что жизнь началась в «теплой луже»

**1924**

Александр Опарин в книге «Возникновение жизни на Земле» представляет теорию «первичного бульона»

**1953**

Издание результатов экспериментов Стэнли Миллера по лабораторному зарождению жизни

Можно лишь догадываться, какие именно молекулы и в каких условиях породили жизнь на планете, и химики эту угадку страшно любят. Ибо понимание, как возникла жизнь, — это не только знание нашего происхождения, но и возможность создать новые формы жизни в лаборатории.

## МИЛЛЕРОВ СУП

Вы, быть может, слышали о Стэнли Миллере и его знаменитых экспериментах по зарождению жизни, еще в 1950-х годах. Но даже если не слышали о нем самом, знаете о его «бульоне». С американским химиком Миллером многие связывают представление о возникновении жизни из первичного бульона. Вообще-то источник этой теории — книга куда менее известного ученого Александра Опарина «Возникновение жизни на Земле» (1924). По версии Миллера, этот «бульон» состоял из метана, аммиака, водорода и воды, которые ученый грел в колбе в лаборатории университета Чикаго. Этот состав должен был воссоздавать бескислородную атмосферу молодой Земли. Чтобы подтолкнуть вещества к действию, он пропускал через смесь электрические искры, моделируя разряды молний в атмосфере планеты.

**В ЭТОМ АППАРАТЕ МЫ ПОПЫТАЛИСЬ ВОСПРОИЗВЕСТИ ПЕРВОБЫТНУЮ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ...**

Стэнли Миллер (1930–2007), американский химик, цитата из журнала «Сайенс», 1953 год

Бульон Миллера показал некоторые результаты: из неорганических веществ и при определенных условиях могла возникнуть органическая молекула. Миллер и его научный руководитель Херолд Юри проанализировали состав бульона через несколько дней после эксперимента и обнаружили в смеси продуктов реакций аминокислоты — строительный материал белков.

Теория первичного бульона, впрочем, несколько отстала от времени. Эксперименты Миллера среди его поклонников и любителей химии по праву считаются классическими, но есть и те, кто полагает, будто исходный состав смеси не воспроизводит условий на планете древних времен: кое-кто не уверен, что разряды молний могли обеспечить постоянное энергоснабжение «бульона», чтобы случился переход от органических веществ к клетке. Неудивительно, что возникло множество новых теорий, описывающих возможные варианты химического начала жизни.

### 1986

Выдвинута РНК-гипотеза: эволюция началась с самовоспроизводящейся РНК

### 2000

Открытие гидротермального поля Зброшенного города

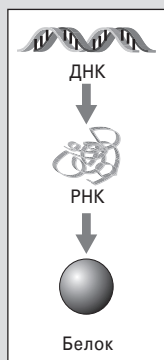
### 2011

Исследователи из Кембриджа, Англия, создают самовоспроизводящуюся РНК, способную кодировать более 90 символов (оснований)

## Незадача с удвоением

В некий момент эволюции клетки должны были обзавестись ДНК как переносчиком данных, но прежде могло сгодиться что-нибудь попроще. РНК, эдакая ДНК в одну нить, — как раз такая молекула, однако без особой копировальной техники, какая есть у современных клеток, РНК самой пришлось бы воспроизводить себя. Для этого ей нужно было стать, по сути, ферментом, который помогает собственному удвоению. Ну допустим, но тогда такая РНК должна существовать. А если нет? Тогда теория прахом? В некотором смысле да. Именно такова была незадача с этой теорией — и довольно долго: ученые в поиске особой последовательности аминокислот, которая кодировала бы самоудвоение, перекопали триллионы молекул РНК, но пока ни одной подходящей не подобрали. Большинство найденных «самореplikаторов» могут удваивать лишь фрагменты собственного кода, а к тому же и качество этого удвоения часто так себе. Поиск продолжается...

Современный мир

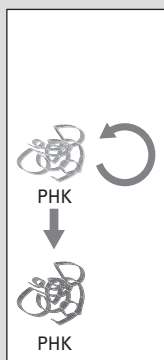


Хранение информации

Хранение/передача информации

Результат

Мир РНК



## ЗАБРОШЕННЫЙ ГОРОД

Современная теория считает, что жизнь началась глубоко в океане, в месте, именуемом Зброшенным городом. Интригует, да? Зброшенный город в Атлантическом океане открыла в 2000 году команда ученых под руководством Донны Блэкмен из Калифорнийского института океанографии Скриппса. Ученые с борта судна «Атлантис» при помощи видеокамер с дистанционным управлением исследовали подводную гору и наткнулись на поле гидротермальных источников — 30-метровых труб, из которых посреди холодного темного океана валила теплая щелочная вода.

Подобные системы гидротермальных источников существуют много где в океане, и их понаоткрывали не один десяток лет назад, но некоторые химики полагают, что источники Зброшенного города — идеальные условия для возникновения жизни на Земле. Здесь водород из источников и диоксид углерода, растворенный в морской воде, могут вступить в реакцию и, возможно, образовать органические вещества. Кроме того, вода из источников подогрета снизу горячими недрами под океанским дном, а это — бесперебойная подача энергии.

Еще один убедительный довод в пользу теории Зброшенного города: разница в кислотности между водой из источников и морской соответствует этой же разнице по обе стороны от клеточной мембраны. Совпадение ли это? Проверить теорию на дне океана не так-то просто, но маленькие реакторы, воспроизводящие условия Зброшенного города, в лабораториях уже строят.

## ТЕМ ВРЕМЕНЕМ В ЛАБОРАТОРИИ

Не все химики, впрочем, изучают происхождение жизни из чистого любопытства. Есть такие, кому хочется выяснить ключевые составляющие биологического существования и попытаться создать жизнь в лаборатории. Речь, конечно, не об искусственных коровах и не о клонировании ребятешек — речь о том, как применить простые исходные материалы и с их помощью воссоздать клеточные мембраны. В настоящих клетках такие мембраны состоят из жировых молекул. Фокус в том, чтобы ввести некую самоудваивающуюся систему, которая позволит самодельным «клеткам» воспроизводить самих себя. Есть ученые, которые заявляют, что подобные самовоспроизводящиеся клетки совсем скоро будут созданы.

Вопрос: что нам проку от этих протоклеток? Вообразите, что вам нужно создать самовоспроизводящуюся систему, которая продолжит копировать саму себя, пока ее питают. Вы бы такую систему к чему применили? Разумный ответ — к лекарствам и топливу. Но зачем себя ограничивать? Вообразите что угодно — от пива до розовых шнурков. Ученые уже замахиваются шире: предлагают, к примеру, создать живые, самообновляющиеся краски.

## Протоклетки

В ноябре 2013 года нобелевский лауреат по биологии Джек Шостак и его коллеги создали минималистский вариант живой клетки, или протоклетку, заключенную в жировую оболочку. Хотя эта клетка была проще даже самой простой бактериальной из ныне живущих, в ней содержалась РНК, способная (ну примерно) воспроизводить саму себя. Это воспроизведение катализировали ионы магния. Необходимо было добавить цитрат-ионы, иначе ионы магния разрушают внешнюю оболочку. Вполне возможно, что создание протоклеток, полностью способных к воспроизводству, — лишь вопрос времени.

## В сухом остатке:

## Живое, возникшее из неживого

**Может показаться, что в космосе мало что происходит, раз там пусто, но дел там для химиков выше головы — особенно для тех, кто интересуется происхождением жизни на Земле, не говоря уже о возможности жизни где-нибудь еще. Давайте разберемся, что им там интересно, помимо воды на Марсе?**

**З**емная атмосфера богата на всякую химию. В ней битком молекул, которые беспрестанно налетают друг на друга и взаимодействуют. На уровне моря в каждом кубическом сантиметре содержится  $10^{19}$ , то есть 10 000 000 000 000 000 000 молекул. Космический вакуум в сравнении с этим — совсем другое дело. В каждом кубическом сантиметре межзвездного пространства содержится одна-единственная частица. Всего одна. Это равносильно пчеле, пролетающей над городом размером с Москву.

Одной лишь редкости молекул в космосе достаточно, чтобы усомниться в возможности их встречи и взаимодействия. А тут вдобавок еще и с энергией все непросто. Земная атмосфера, в общем, довольно теплая, даже если это вам морозное утро в Лондоне или Нью-Йорке. А в межзвездном пространстве температура опускается до студеной  $-260^\circ\text{C}$ . При таких температурах все движется совсем не спеша, а это значит, что молекулы, даже если встретятся, лишь слегка соприкоснутся, но им не хватит энергии вступить в реакцию. С учетом таких вот специфических условий удивительно, что химия тут вообще происходит. Скорее, встает вопрос, почему химикам тут интересно.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**13,8 миллиарда лет назад**

Большой взрыв

**400 000 лет после Большого взрыва**

Образуются первые молекулы. Начинается химия!

## ГДЕ ПОГОРЯЧЕЕ

Невзирая на кажущуюся скудость настоящей химии, уйма химиков увлеченно исследуют все, что найдут в космосе, — и не просто так. Химия космоса может объяснить нам, как зародилась Вселенная, откуда взялись химические элементы, необходимые для жизни, и может ли жизнь существовать где-нибудь еще, помимо нашей планеты. Но прежде чем разговаривать о сложной химии биологических реакций, нам нужно осмыслить условия в космосе, какие молекулы там имеются и как протекают химические реакции.

Знание неких усредненных условий в космосе не дает нам понимания, как оно есть на самом деле в отдельно взятых точках. Есть места, где пусто и холодно, но Вселенная столь огромна, что условия в ней варьируют в широчайшем диапазоне. Межзвездное пространство — не равномерное море сильно разреженных газов. Есть в космосе холодные и плотные молекулярные облака, содержащие водород, а есть и сверхгорячие места — рядом со взорвавшимися звездами.

Более 99% межзвездной среды заполнено газами — водородом (две трети по массе) и гелием (почти все остальное). Углерода, азота, кислорода и частиц других элементов совсем по чуть-чуть. Еще 1% — компонент, который придется по нраву тем, кто читал «Темные начала» Филипа Пулмана [Пулмена]: пыль. Эта пыль не похожа на ту, которую вы стираете с подоконника, не похожа она — скажем ради поклонников Пулмана — и на вымышленные частицы сознания.

## ПЫЛЬ

Межзвездная пыль состоит из мелких зерен, содержащих силикаты, металлы и графит. Важно в этих крупинках пыли вот что: одиночим частицам, болтающимся в необозримых просторах космоса, есть где перекантоваться. И покантовавшись подольше, они могут наконец

**“ МЫ ОТМЕНИЛИ КОСМОС У НАС ТУТ, НА ПЛАНЕТКЕ ЗЕМЛЯ, НО НИКОГДА НЕ СМОЖЕМ ОТМЕНИТЬ ЕГО ТАМ, ГДЕ ОН ЗИЯЕТ МЕЖ ЗВЕЗД ”**

Артур Чарлз Кларк (1913–1993),  
английский писатель, ученый,  
футуролог, изобретатель;  
цитата из книги «Черты будущего» (1962)

**1937**

В межзвездном пространстве впервые обнаружены молекулы

**1987**

В межзвездном пространстве замечен ацетон

**2009**

Общее число видов молекул, определенных в межзвездном веществе, переваливает за 150

**2013**

В космосе обнаружен диоксид титана

## Жизнь на Марсе

Марс, наш ближайший сосед по Солнечной системе, издавна притягивал внимание ученых, ищущих жизнь за пределами нашей планеты. Наличие воды, которую астробиологи считают необходимой для жизни, поначалу подсказывало, что на Марсе и впрямь можно обнаружить нечто живое. Однако уже известно, что вода на Марсе в основном присутствует в виде льда под поверхностью планеты или же обволакивает частицы почвы. Теоретически какой-нибудь космонавт, если очень захочет пить, сможет нагреть несколько горстей марсианской почвы и добыть глоток воды. В 2014 году в журнале исследований Солнечной системы «Икар» были опубликованы снимки чего-то подозрительно похожего на каналы, и кое-кто предположил, что по поверхности Красной планеты когда-то текла вода. Но нет доказательств, что вода на Марсе в каком бы то ни было виде питала или до сих пор питает жизнь.

встретить другую молекулу и вступить с ней в реакцию. Некоторые крупинки замкнуты в оболочку из замерзшей воды, и химия льда в таком случае — ключ к пониманию, что может происходить на этих крупинках. Другие составляющие пыли могут оказать услуги катализа и помочь редким реакциям все-таки случаться. Когда энергии мало, реакциям помогает УФ-излучение звезд, космические и рентгеновские лучи, а некоторым реакциям энергии и вовсе не требуется.

В 2013 году астрономы на Гавайях, производившие радионаблюдения за далеким космосом при помощи телескопа в субмиллиметровом диапазоне, обнаружили признаки диоксида титана в частицах пыли возле очень яркой звезды-супергиганта VY Большого Пса. Диоксид титана — то же вещество, которое применяется в кремах от загара и в белой краске. Ученые предположили, что в космической пыли это вещество может играть важную роль в катализе реакций, в ходе которых образуются большие сложные молекулы.

## СЕМЕНА ЖИЗНИ

Большие молекулы, впрочем, — штука для космоса редкая, насколько нам известно. Со времен открытия в космосе радикалов  $\text{CN}^{\bullet}$  и  $\text{CH}^{\bullet}$  и ионов  $\text{CN}^+$  прошло чуть менее 80 лет. С тех пор нашлись еще около 180 «сложных» частиц, но в основном из шести атомов или меньше. Ацетон  $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$  — молекула из десяти атомов, и это одна из крупнейших находок, ее обнаружили в 1987 году. Большие углеродсодержащие молекулы вроде полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) — вот что астрохимикам интереснее всего, потому что эти молекулы могли поведать нам о том, как органика вообще впервые образовалась.

## ПАУ

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — многообразная группа веществ, у которых в составе молекул есть бензольные кольца. На нашей планете это продукты неполного сгорания, и присутствуют они в горелом гриле и в мясе-гриль, а также в выхлопе автомобилей. Их засекали и всюду в космосе, еще с середины 1990-х, в том числе и в старых, порождающих звезды областях, хотя присутствие их напрямую не подтверждено.

Антантрен  $C_{22}H_{12}$ Нафталин  $C_{10}H_8$ Пирен  $C_{16}H_{10}$ Хризен  $C_{18}H_{12}$ 

ПАУ и другие органические молекулы часто ведут к теориям происхождения жизни, в которых жизнь на Земле «засеяли» из космоса. Аминокислоты в космосе тоже, говорят, засекли, но это еще предстоит подтвердить.

Астрохимики не только ищут следы интересных молекул — есть еще всякие инструменты и приемы, с помощью которых лабораторно моделируют возможные во Вселенной события. В вакуумных камерах, к примеру, можно воссоздать маленькие фрагменты межзвездной «пустоты», которая, как мы теперь знаем, не совсем уж пустая, и попытаться понять, как именно протекают там химические реакции. Вместе с моделированием такой подход помогает прогнозировать состав молекул и реакции, которые позднее, когда позволит развитие техники, возможно, удастся подтвердить. Новые мощные телескопы — например, Большой телескоп миллиметрового диапазона волн в чилийской пустыне Атакама — должны помочь химикам подтвердить или опровергнуть самые смелые теории.

**В сухом остатке:**  
**Химия в телескопе**



# 32 Белки

**Белок, по идее, ключевая часть нашего рациона, но знаем ли мы почему? Чем именно занят белок у нас в организме? Очень много чем — гораздо бóльшим, чем нам известно. Белок — многоцелевая молекула, разновидностей белка невообразимо много, и каждая уникально приспособлена для своих задач.**

**М**ножество разных функций, выполняемых белками, обусловлено поразительным разнообразием структур белковых молекул: белок — это и крепкая эластичная нить паутины, и антитела, защищающие нас от болезней, и всё, что в промежутке. Мы, допустим, в курсе, что наши мышцы состоят из белков, но иногда мы забываем, что это семейство веществ отвечает за самые разные непростые задачи внутри живых организмов. Их даже называют «рабочими лошадками» клетки. Так что же такое белок?

## БУСИНЫ НА НИТКЕ

Белки — это цепочки аминокислот, соединенных пептидными связями. Вообразите нитку разноцветных бусин, каждый цвет соответствует той или иной аминокислоте. В природе существует около 20 разных расцветок аминокислот. Производимые вашим телом аминокислоты называются заменимыми, а те, что вам необходимо извлекать из пищи, — незаменимыми (см. «Незаменимые и заменимые аминокислоты», с. 131).

Не все аминокислоты производятся в живых организмах. На метеорите, упавшем близ Мёрчисона (Австралия) в 1969 году, обнаружили по меньшей мере 75 различных аминокислот. Всего за десять лет до этого эксперименты Стэнли Миллера (см. с. 121) с моделированием

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1850**

Первый синтез аминокислоты (аланина) Адольфом Штрекером

**1955**

Фредерик Сэнгер определяет последовательность аминокислот инсулина

**1958**

Кендрию и Перуц посредством рентгеноструктурного анализа получают первый снимок структуры белка (миоглобина) в высоком разрешении

условий зарождения жизни доказали, что на Земле четырехмиллионно-летней давности аминокислоты могли получиться из простых неорганических веществ.

Любая аминокислота имеет одно и то же базовое устройство, соответствующее формуле  $RCH(NH_2)COOH$ . Это означает, что центральный атом углерода связан одновременно с аминной группой ( $NH_2$ ), карбоксильной группой ( $COOH$ ) и водородным атомом. Группа R, тоже соединенная с центральным углеродом, как раз та часть, которая сообщает аминокислоте ее уникальные свойства. В паутине, к примеру, содержится много глицина — аминокислоты самой простой, с мельчайшими среди аминокислот молекулами, в которых R-группа — водород. Полагают, что как раз из-за глицина нить паутины такая эластичная.

Порядок следования бусин в аминокислотной цепочке называется первичной структурой белка. То есть белок, как и ДНК, можно секвенировать. В зависимости от разновидности паутины и ее применения последовательность аминокислот в ней может слегка различаться. Тем не менее, как ныне известно, примерно 90% любой последовательности состоит из повторяющихся отрезков по 10–50 аминокислот.

**КОГДА Я УВИДЕЛ, КАКАЯ КРАСИВАЯ И ИЗЯЩНАЯ КОНСТРУКЦИЯ АЛЬФА-СПИРАЛЬ, МЕНЯ СЛОВНО МОЛНИЕЙ ПОРАЗИЛО**

Макс Перуц (1914–2002),  
английский биохимик, об открытии  
структуры альфа-спирали гемоглобина

## СВЕРХСТРУКТУРЫ

Более высокие уровни организации в белках обусловлены свернутостью аминокислотных цепочек (вторичная структура) в трехмерные фигуры (третичная структура). Существует несколько часто встречающихся вторичных структур: если вернуться к примеру с паутиной, сильная нить, характерная для пауков-кругопрядов, из которой они строят каркасы своих тенет, состоит из цепочек, слагающих подобную полотну плоскость благодаря развитым водородным связям (см. с. 20). Такие  $\beta$ -листы (складчатые слои) встречаются и в кератине — это еще один структурный белок, входящий в состав вашей кожи, волос и ногтей.

**1988**

Белок химозин (реннин), производимый генетически модифицированным сортом дрожжей, одобрен к употреблению в пищу

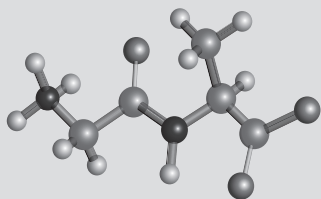
**2009**

Вручена Нобелевская премия по химии за реакции синтеза белка

## Нанизываем аминокислоты

Клеточная машинка, отвечающая за нанизывание аминокислот в белковую цепочку, называется рибосомой. Ее задача — образование пептидных связей между отдельными бусинами; такая связь возникает между карбоксильной группой одной аминокислоты и аминогруппой другой, при этом высвобождается молекула воды. Рибосома способна соединять до 20 аминокислот в секунду, и делает она это по инструкции, выданной кодом ДНК. Такая пруть синтеза, очевидно, усложняет изучение происходящих реакций. Но, разобравшись в устройстве рибосомы рентгеновским методом (см. с. 88), американский химик Томас Стейц с этой задачей справился. Он кристаллизовал рибосому на разных стадиях реакции присоединения следующей аминокислоты и получил трехмерные структуры, открывшие нам происходящие процессы пошагово, до отдельных атомов. В 2009 году Стейц получил за эту работу Нобелевскую премию по химии.

Глицин связывается с аланином, и образуется дипептид глицилаланин



Еще более распространена структура альфа-спирали, похожая на пружину, — как у гемоглобина, переносящего кислород компонента крови, а также у мышечного белка миоглобина.

В нити паутины именно  $\beta$ -листы, судя по всему, обеспечивают белковым нитям прочность, сопоставимую со стальной. (Имеет смысл отметить, что эта невероятная прочность сочетается с эластичностью большей, чем у нейлона, и стойкостью большей, чем у рукотворного кевлара, из которого делают бронежилеты.) Нити паутины — источник вдохновения для нескольких компаний, пытающихся создать искусственный паучий шелк. Одна такая компания, лаборатории «Крейг Биокрафт», разработала подобное паутине волокно под названием «монстр-шелк»: его прядет генетически модифицированный шелкопряд. «Крейг Биокрафт» хочет не просто воспроизвести природный шелк — есть намерение даже улучшить его, добавив, например, антибактериальные функции.

## РАЗНООБРАЗИЕ РОЛЕЙ

Белки — не просто строительный материал, они контролируют и осуществляют большую часть того, что происходит в клетке. По некоторым оценкам, типичная животная клетка на 20% состоит из белка и содержит тысячи разновидностей этих веществ. Такое разнообразие форм вообразить нетрудно, если знать, что белковая цепочка может существовать более чем в трех миллионах сочетаний бусин, даже при длине всего в пять аминокислот, а большинство белков гораздо, гораздо длиннее. Но даже когда белок не участвует в строительстве организма, его форма все равно чрезвычайно важна.

Одна из важнейших ролей, которые белки играют в клетке, — выполнение биокатализа, а белки с такой функцией называются ферментами (см. с. 132), они контролируют скорость химических реакций. Устройство белка и его трехмерная форма — ключ к решению этих задач, поскольку этим определяется характер взаимодействия между ферментом и молекулами, участвующими в реакции. Биокатализаторы зачастую ведут очень избранные реакции — они куда более избирательны, чем химические катализаторы, применяемые для ускорения промышленных процессов.

Белковая структура необычайно важна и в иммуноглобулинах — антителах, которые наша иммунная система применяет в борьбе с болезнями. Подцепив тот или иной штамм гриппа, ваше тело произведет антитела, которые оградят вас от этого штамма в будущем. Антитела — иммуноглобулиновые молекулы на основе белка, которые распознают и химически связывают характеристический отрезок ДНК вируса, а такое распознавание происходит благодаря специфической структуре того или иного антитела. Реорганизация генов в клетках, производящих антитела, позволяет нашему организму создавать белковые структуры, дающие отпор миллионам различных оккупантов.

К сожалению, важность белковой структуры проявляется ярче всего, когда что-нибудь идет наперекосяк. Болезнь Паркинсона — результат неправильного складывания белка в нервных клетках. Ученые все еще пытаются понять, не порождает ли неправильная структура белка другие убийственные недуги — вроде болезни Альцгеймера.

### Заменимые и незаменимые аминокислоты

Вот список незаменимых аминокислот у взрослых людей: фенилаланин, валин, треонин, триптофан, изолейцин, метионин, лейцин, лизин и гистидин. Их необходимо получать с пищей. Заменимые аминокислоты таковы: аланин, аргинин, аспарагиновая кислота, цистеин, глутаминовая кислота, глутамин, глицин, пролин, серин, тирозин, аспарагин и селеноцистеин. У некоторых людей организм не умеет производить все заменимые аминокислоты по списку, и им приходится дополнять их с едой.

## В сухом остатке:

## Функция — от формы

# Действие ферментов

Как биологические катализаторы, ферменты ведут самые разные реакции — от метаболических процессов в нашем организме до реакций, позволяющих вирусам размножаться у нас в клетках. Существует две модели ферментных реакций, разработанные за прошлый век. Обе модели пытаются объяснить, почему тот или иной фермент специфичен для реакции, которую он катализирует.

**Н**емецкий биохимик Герман Эмиль Фишер, похоже, имел примечательную слабость к горячим напиткам: его интересовали пурины в чае, кофе и какао. Как-то раз он добавил к смеси сахара и молоко в виде лактозы. Окольными путями это привело его к изучению ферментов. В 1894 году он доказал, что реакции гидролиза, в которых происходит распад лактозы на два составляющих ее сахара, можно катализировать ферментом, и в тот же год опубликовал статью, в которой обрисовал теорию работы фермента.

## КЛЮЧ-ЗАМОК

Ферменты — это биологические катализаторы (см. с. 48), которые ведут реакции во всех живых существах. Теория «ключ-замок», предложенная Фишером, основывается на наблюдении, как один из его любимых сахаров встречается в двух слегка отличающихся разновидностях (в двух изомерных формах) и их гидролиз ведут два разных природных фермента. Реакция с альфа-изомером происходила только посредством фермента, полученного из дрожжей, а с бета-изомером — с ферментом, полученным из миндаля. В состав обоих изомеров входят одни и те же атомы, соединены эти атомы примерно одинаково, но все же им требуются разные ферменты.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1894**

Герман Эмиль Фишер предлагает модель действия фермента «ключ-замок»

**1926**

Джеймс Самнер впервые кристаллизует фермент (уреазу)

Фишер представил две разные формы сахара как ключи, которые подходят лишь к своим замкам.

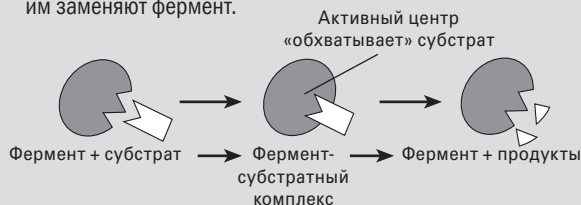
Распространив эту теорию на ферменты и их субстраты («ключи») шире, Фишер разработал первую модель действия ферментов, которая могла объяснить их важнейшую особенность — специфичность. После смерти Фишера прошел не один десяток лет, прежде чем его теория оказалась опровергнута, но меж тем с ферментами еще было чем заняться.

### ПОКАЗАТЬ ИМ ВСЕМ

От Фишера ускользнуло одно наблюдение: у всех ферментов единое происхождение — все они белки, состоящие из аминокислот (см. с. 128). А вот Джеймсу Самнеру, еще одному харизматичному химику, это стало очевидно, однако доказательство далось ему нелегко. Самнер был человеком упрямым: несмотря на ампутацию левой руки, случившуюся из-за неудачного инцидента на охоте, еще в юности, он решил, что добьется успехов

## Активный центр

Активный центр фермента — участок, удерживающий субстрат, именно здесь происходит реакция между ферментом и субстратом. Этот участок может состоять всего из нескольких аминокислот. Все, что меняет структуру активного центра, влияет и на особенности соединения фермента с субстратом, и вероятность успешного протекания реакции при этом уменьшается. К примеру, повышение или понижение pH среды — это увеличение или уменьшение концентрации ионов водорода (см. с. 44), а ионы водорода взаимодействуют с группами в аминокислотах в активном центре и меняют его устройство. Любая молекула, химически связываясь с ферментом так, что активный центр блокируется, называется конкурентным ингибитором, поскольку соперничает с молекулой субстрата. Молекулы, связывающиеся с ферментом не в активном центре, но все же меняющие при этом его структуру, называются неконкурентными ингибиторами. Генетические изменения тоже могут влиять на действие ферментов, особенно если такие изменения происходят в порядке аминокислот в активном центре. К примеру, болезнь Гоше — это мутация, при которой меняется устройство активного центра фермента глюкоцереброзидазы, в результате чего в организме накапливается избыток субстрата (глюкоцереброзида). Впрочем, заменить порченный фермент можно: по всему миру проходят лечение примерно 10 000 человек, страдающих болезнью Гоше, — им заменяют фермент.



**1930**

Дж. Х. Нортроп  
кристаллизует пепсин

**1946**

Самнер получает  
Нобелевскую  
премию по химии

**1958**

Дэниэл Кошленд-мл. пред-  
лагает модель индуциро-  
ванного соответствия

**1995**

Установлена  
кристаллическая  
структура уреазы

в спорте, и выиграл кубок Корнеллского преподавательского теннисного клуба. Его упрямство, судя по всему, распространялось и на его исследовательские труды: несколько человек советовали ему перестать глупить и бросить попытки выделить фермент, но он продолжил двигаться к цели — и через девять лет ее достиг.

В 1926 году Самнер стал первым человеком, кристаллизовавшим фермент, — он выделил уреазу из бобов канавалии мечевидной. (Уреаза — фермент, из-за которого в человеческом желудке процветает *Helicobacter pylori*, а из-за этих бактерий приключается язва. Фермент расщепляет мочевину, pH повышается, и среда делается для этих бактерий приятнее.) Самнеру никто не верил, что уреазы — белок, и он взялся доказать всеобщую неправоту: опубликовал десять статей на заданную тему, просто чтобы все поняли наверняка и бросили спорить. И конечно, Нобелевская премия, врученная Самнеру, его точку зрения поддержала дополнительно.

### ЛУЧШЕЕ СООТВЕТСТВИЕ

В те времена по-прежнему считали, что модель «ключ-замок» наиболее точно описывает действие фермента. Если уреазы — замок, тогда мочевина — ключ. Но в 1950-х американский биохимик Дэниэл Кошленд пересмотрел стареющую Фишерову модель. Его модель индуцированного соответствия жива и поныне. Кошленд адаптировал жесткий «замок» теории Фишера, поскольку ферменты состоят из белковых цепочек, а у них структура гибче.

На белки и ферменты влияют внешние условия — нагревание, например: когда температура человеческого тела повышается, деятельность ферментов быстро затухает; влияет на нее и присутствие других мо-

**МНОГО КТО ГОВОРИЛ МНЕ, ЧТО  
ГЛУПЫ МОИ ПОПЫТКИ ВЫДЕЛИТЬ  
ФЕРМЕНТ, НО ЭТИ СООБРАЖЕНИЯ  
УКРЕПИЛИ МЕНЯ В МЫСЛИ, ЧТО ЦЕЛЬ  
МОЯ ДОСТОЙНА, ОСОБЕННО ЕСЛИ ДО  
НЕЕ ДОБРАТЬСЯ**

Джеймс Бетчеллер Самнер (1887–1955),  
американский биохимик

лекул. Кошленд понял: когда молекула субстрата сталкивается со своим высоко-специфичным ферментом, происходит изменение формы фермента, и они точнее подходят друг другу. Отсюда и название модели — «индуцированное соответствие». Эти изменения случаются в области активного центра в ферменте, который и образует Фишеров «замок». То есть мочевина не совпадает с активным

центром уреазы, как рука с перчаткой. Скорее, молекула субстрата усаживается поудобнее, как мы с вами — в кресле-мешке.

Модель индуцированного соответствия получила более широкое применение — в механизмах биохимического связывания и распознавания. Эта модель помогает разобраться, к примеру, в том, как гормоны связываются со своими рецепторами и как действуют некоторые лекарства. Действие препаратов от ВИЧ — неврипина или эфавиренца — основано на их связывании фермента под названием «обратная транскриптаза», с помощью которого вирус создает в человеческой клетке свою ДНК и размножается. Лекарства образуют химические связи рядом с активным центром фермента, меняют таким образом его структуру и не дают ферменту выполнять его работу, в результате чего вирус не может воспроизводить свою ДНК и размножаться.

Обе модели действия ферментов преподают в школе, и это прекрасный пример того, как по мере поступления новых сведений эволюционирует научная мысль. Ревизия модели, произведенная Дэниэлом Кошлендом, основывалась и на данных о гибкости белковой структуры, и на наблюдаемых аномалиях катализируемых процессов, и Кошленд постепенно понял, что со старой теорией не все ладно. Тем не менее из глубочайшего почтения к Фишеру, которого считают отцом биохимии, Кошленд неизменно говорил, что лишь развил работу великого ученого. Он даже писал: «Говорят, любой ученый стоит на плечах исполинов, предшествовавших ему. Нет места почетнее, чем на плечах у Эмиля Фишера».

## Ферменты в промышленности

Ферменты применяются в самых разнообразных отраслях промышленности. Биоактивные моющие средства содержат ферменты, разрушающие вещества в составе пятен на тканях, и тем сберегают энергию, необходимую для очистки одежды от грязи. Пищевая промышленность применяет ферменты в превращениях одних сахаров в другие. Загвоздка лишь в том, что ферменты — это белки, и их действие ограничено довольно узким диапазоном внешних условий, и потому температуру, давление и кислотность среды приходится жестко контролировать.

## В сухом остатке:

## Природные катализаторы



# 34 Сахара

**Сахара — природное топливо, и они, вместе с белками и ферментами, одни из важнейших биоматериалов. Они дают нашим мышцам силы бегать, а мозгу — думать. Они даже сшивают воедино нашу ДНК. Но они же содействуют ожирению и помогают вирусам проникать в клетки.**

**Д**опустим, заказали вы себе в пятницу вечером пиццу, а утром в субботу решили ее «сжечь» — побегать. Говорим «сжечь» — подразумеваем в таких случаях реакцию, в которой наше тело разлагает сахара и так извлекает из них энергию. Подобно углю, сахар — топливо, для качественного горения ему нужен кислород, и в результате получаются энергия, диоксид углерода и вода. Мы получаем сахара из пищи, растения — фотосинтезом (см. с. 148), и потому большая часть сахаров поступает к нам в организм из растительных продуктов.

Но сахара — это не только топливо природы. Понимая, что уголь, нефть и природный газ истощаются, люди все больше думают о том, как массово извлекать энергию из растений. Биотопливная промышленность обещает возобновимую энергию сахаров, а сложные сахара — крахмал и целлюлоза, например, — содержатся в выращиваемых для этого растениях, а также в растительных отходах, хотя такой источник энергии требует посадочной земли и конкурирует с производством продовольствия.

У сахаров, помимо топливных, есть и другие задачи. Так, производные рибозы, например, входят в состав молекул ДНК и РНК, хранящих генетическую информацию. Вместе с белками сахара образуют рецепторы клеток и, к примеру, позволяют вирусам проникать

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1747**

Немецкий химик Андреас Маргграф выделяет кристаллы из свекольного сока и сравнивает их с кристаллами тростникового сахара

**1802**

Открывается первая фабрика по производству свекольного сахара

**1888**

Эмиль Фишер обнаруживает связь между глюкозой, фруктозой и маннозой

в клетки, а еще они передают сообщения между далекими друг от друга клетками, действуя как гормоны. А еще, что не менее удивительно, растения с помощью сахаров определяют время суток.

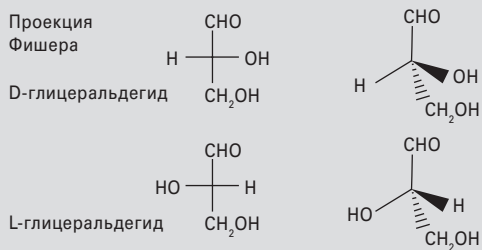
## СЛОВО НА -ОЗА

Сахар, который вы ложками сыплете себе в чай или кофе, — сахароза, то же вещество, которое накапливают растения, а мы извлекаем из сахарного тростника или свеклы. Но существует множество других разновидностей сахаров. В составе пищевых продуктов их можно опознать по хвосту слова — -оза: глюкоза, фруктоза, сахароза, лактоза. Химически все они углеводы. У одних углеродная цепочка короткая, у других в молекулах есть кольца, но, попросту говоря, во всех содержится углеродный атом, связанный двойной связью с кислородным атомом. Нобелевский лауреат Эмиль Фишер, всерьез занимавшийся сахарами, в 1888 году первым понял связь между глюкозой, фруктозой и маннозой.

Менее очевидные формы сахара — те, что состоят из соединенных между собой многих простых форм сахара; такие цепи называются полисахаридами. Пример — мальтодекстрин,

## Сахара и стереоизомеры

На рисунке внизу — две версии глицеральдегида, простого сахара (моносахарида). Как и глюкоза, он содержит одну альдегидную группу ( $-\text{CHO}$ ). В любом сахаре есть кетонные или альдегидные группы. В кетонной группе кислород связан с углеродом, который, в свою очередь, связан с двумя другими углеродсодержащими группами, а в альдегидной группе между углеродом и кислородом связь двойная, а одну из двух других связей углерод имеет с водородом. По рисунку видно, что структуры очень похожи, а разница в том, что у L-глицеральдегида группы  $\text{OH}$  и  $\text{H}$  крепятся в обратном порядке по сравнению с D-глицеральдегидом. Повернуть одну молекулу так, чтобы она совпала с другой, никак нельзя. Все потому, что это стереоизомеры: все атомы и связи между ними одинаковые, а трехмерная организация молекул — разная. Стереоиomerия бывает разная, один из ее видов — энантиomerия; энантиомеры — зеркальные отражения друг друга (см. с. 72). Правила изображения стереоизомеров на плоскости разработал Эмиль Фишер в 1891 году, пока изучал сахара.



**1892**

Фишер устанавливает трехмерную структуру 16 гексоз

**1902**

Фишер получает Нобелевскую премию по химии за исследование сахаров и ДНК-оснований

**2014**

Химики объявляют о создании портативного датчика сахара в крови для постоянного ношения на теле

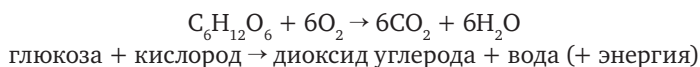
## Следим за сахаром

Распознавание концентрации сахара в крови особенно важно для страдающих диабетом или желающих похудеть. В 2014 году химики и технологи из новой компании «Глюковейшн» объявили, что их навыков и умений хватило для создания первого носимого датчика сахара в крови, который сможет круглосуточно следить за уровнем глюкозы в организме. Теперь диабетикам (и помешанным на собственном здоровье) придется втыкать в себя иголку лишь раз в неделю и следить за содержанием сахара с помощью своего смартфона.

полимер глюкозы, который получают из маиса или пшеницы и добавляют к энергетическим порошкам и гелям, популярным у спортсменов. Ученые разрабатывают и биоразлагаемые батарейки на мальтодекстрине. Как и в природе, реакции в таких батарейках работают на ферментах, а не на дорогих металлах-катализаторах, как в традиционных элементах питания.

## ТАК ИЛИ ИНАЧЕ

Для людей самая важная разновидность сахара, похоже, глюкоза — простой моносахарид, состоящий из одного вида молекул. Сахароза, напротив, — дисахарид, состоящий из глюкозы и фруктозы, соединенных гликозидной связью. Энергию для клеток тела мы извлекаем из сахара путем многостадийной ферментативной реакции. Выглядит она так:



На самом деле все несколько замысловатее, но суммарная реакция, по крайней мере, показывает, каковы исходные реагенты и продукты. Кислород в реакции значим, поскольку без него глюкоза окисляется хуже и превращается в молочную кислоту, вещество, получающееся брожением дрожжей, а еще из-за нее при физических нагрузках устают мышцы. Энергия при таком производстве молочной кислоты тоже выделяется, но ее выход гораздо ниже, чем при полном окислении глюкозы.

В спортивной биохимии вообще много интересного, связанного с тем, как эти две реакционные системы — аэробная и анаэробная — работают, например, при марафонских забегах.

Допустим, бегуны в 400- и 800-метровых забегах сжигают сахара аэробно, однако мышцам для аэробного производства энергии кислорода не хватает, и они вынуждены вести параллельный анаэробный процесс.

Аэробный процесс перехватывает инициативу у анаэробного лишь через 30 секунд бега — или даже позже, и потому мастера 400-метровых забегов, финиширующие за 45 секунд, вынуждены довольствоваться анаэробно извлеченной энергией, а вот бегуны на 800 метров черпают энергию в основном из «нормального» процесса сжигания глюкозы.

### САХАР-О-КЛОК

Хотя сахара — важнейший источник энергии, мы отлично знаем, что за содержанием сахара в организме необходимо внимательно следить. От избыточной глюкозы, накапливаемой в печени и мышцах в виде полисахарида гликогена, беды не будет, если вы вышеупомянутый мастер забегов на 400-метровые дистанции, — тогда у вас гликоген не задержится. Но если избыток сахара подолгу при вас, тело постепенно превратит его в жир и распахает по жировым клеткам как энергетически богатый запас на черный день — ну вдруг вы решите начать марафоны бегать. Мозг же хорошо работает исключительно на глюкозе, и это соображение можно счесть отличным оправданием и слопать кусок другой торта, если привалило работы.

Сказать вам уже наконец, как растения определяют время по сахару? Так вот, в 2013 году ученые университетов Йорка и Кембриджа (Англия) обнаружили, что циркадные ритмы растений связаны с накопленным за день сахаром. Утром солнце встало — начался фотосинтез. Сахар накапливается и достигает определенного порогового значения, по которому растение «узнает», что вечереет. Исследователи показали: если не давать растениям возможность проводить фотосинтез, у них сбиваются циркадные ритмы, а если подкармливать их сахарозой, биологические часы у них заводятся заново.

**САХАР — ПЕРВЫЙ ПРИРОДНЫЙ ОРГАНОХИМИЧЕСКИЙ ПРОДУКТ, ИЗ КОТОРОГО СОЗДАЮТСЯ ВСЕ ОСТАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ИЛИ ЖИВОТНОГО ТЕЛА**

Эмиль Фишер (1852–1919), немецкий химик

## В сухом остатке: Нагреватель и неприятель

# 35 ДНК

Главными героями истории про ДНК часто изображают Уотсона и Крика. Но не стоит забывать о первых исследованиях химического содержимого клетки и как важны они оказались для открытия генетического материала. Вероятно, эта часть истории даже интереснее известной.

**Л**юбого обычного человека наизнанку вывернет при мысли покопаться в пропитанных гноем чужих бинтах. Но Иоганн Фридрих Мишер был человеком необычным. Ему хватило интереса к содержимому того самого гноя, чтобы посвятить значительную часть своей рабочей жизни изучению подобных субстанций. Он был из тех людей, кто готов полоскать свиные желудки или топтать на ночную рыбалку ради добычи лососевых молок.

Мишер желал добыть максимально чистые образцы вещества, которое он называл нуклеином. Учился Мишер на врача, но в итоге в 1868 году работать пошел в биохимическую лабораторию Феликса Хоппе-Зайлера в Тюбингенском университете, Германия, и химический состав живых клеток совершенно заворожил Мишера. Эта замороженность не покинула его ни разу, и хотя Мишер, в отличие от Джеймса Уотсона и Фрэнсиса Крика, предложивших модель устройства этой молекулы, возможно, как исследователь ДНК и не прославился, его открытия, несомненно, очень важны.

## ГНОЙ И СВИНЫЕ ЖЕЛУДКИ

Наставнику Мишера Хоппе-Зайлеру была интересна кровь, и первые исследования Мишера посвящены белым кровяным тельцам, которые он в изобилии извлекал из гноя с марлевых бинтов — их ему поставляла ближайшая больница.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1869**

Фридрих Мишер выделяет нуклеин (ДНК) из белых кровяных телец

**1952**

Подтверждено, что ДНК — генетический материал

**1953**

Обнародована модель молекулы ДНК в виде двойной спирали

Так вышло, что незадолго до этого в медицине начали использовать вату — превосходный впитывающий материал. Мишеру тогда великие мысли про биоматериал, отвечающий за наследственность, в голову не приходили, он просто хотел побольше узнать о веществах, присутствующих в живых клетках.

На некоем этапе своих исследований Мишер наткнулся на осадок, который, хоть и вел себя, в общем, как белок, никакой известный тогда белок не напоминал. Судя по всему, он происходил из ядра — массивного центра клетки. Интерес ученого к этому веществу крепнул, Мишер пытался его выделить и так и эдак. Тут-то и понадобились свиные желудки. Они хороший источник пепсина, фермента, помогающего усваивать белки, с его помощью Мишер расщеплял почти любые вещества в составе клетки. Для извлечения этой субстанции ученый ополаскивал внутренности свиных желудков соляной кислотой. С помощью пепсина Мишеру удалось выделить довольно чистый образец серого вещества, которое он назвал нуклеином, — в нем содержалось то, что мы ныне именуем ДНК.

Мишер был убежден, что нуклеин — вещество, важное для понимания химии жизни, и поэтому он не поленился сделать его элементный анализ, проведя множество реакций с разными соединениями и взвешивая продукты: он пытался разобраться, из чего нуклеин состоит. Один элемент присутствовал в образцах в неожиданно заметных количествах — фосфор, и именно это подтолкнуло Мишера к мысли, что он обнаружил совершенно новое органическое вещество. Он даже замерил количества нуклеина, присутствующие в клетке на разных этапах ее жизни, и обнаружил, что наивысшие концентрации накапливаются непосредственно перед делением клетки. Это же мощная подсказка, что вещество связано с передачей информации, и Мишер, конечно, счел нуклеин участником процессов наследования. Но позднее все же отказался от этой идеи,

**ДНК И РНК ПО МЕНЬШЕЙ МЕРЕ  
НЕСКОЛЬКО МИЛЛИАРДОВ ЛЕТ.  
ВСЕ ЭТО ВРЕМЯ ДВОЙНАЯ СПИРАЛЬ  
СУЩЕСТВОВАЛА НА ПЛАНЕТЕ, БЫЛА  
ДЕЯТЕЛЬНА, НО МЫ — ПЕРВЫЕ  
СУЩЕСТВА НА ЗЕМЛЕ, ОСОЗНАВШИЕ  
ЕЕ СУЩЕСТВОВАНИЕ**

Фрэнсис Крик (1916–2004),  
британский молекулярный биолог,  
биофизик, нейробиолог

**1972**

Пол Берг составляет молекулы ДНК из генов разных организмов

**1985**

Полимеразная цепная реакция (ПЦР) — метод получения миллионов копий ДНК

**2001**

Завершен проект «Геном человека»

**2010**

Крейг Вентер создает синтетический геном и вводит его в живую клетку

поскольку же уму непостижимо — одно вещество содержит все сведения для кодирования невероятного разнообразия жизни! Мишер взялся искать такое вещество в молоках лосося, которого ловил в Рейне, а потом в сперме карпов, лягушек и петухов.

## СОБРАТЬ ГОЛОВОЛОМКУ

В работе Мишера с нуклеином назрела неувязка: результаты шли вразрез с привычными представлениями ученых того времени о том, что белок — наследуемый материал. В начале XX века все вновь обратили внимание на белок. В те поры составляющие нуклеина, или ДНК, уже стали известны: остаток фосфорной кислоты, который формирует «хребет» ДНК (этим объясняется обилие фосфора, найденного Мишером), сахар и пять оснований, которые, как мы теперь знаем, и составляют генокод. Но белковые теории казались убедительнее. Двадцать аминокислот в белках — куда большее химическое разнообразие, а значит, логично, что они отвечают за разнообразие жизни.

## Генетический код

Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) состоит из двух цепочек нуклеиновых кислот, скрученных наподобие волокон веревки. Цепи нуклеиновых кислот — последовательность повторяющихся блоков, каждый блок — сочетание основания, сахара и фосфатной группы. Две цепи скрепляют воедино водородные связи (см. с. 20) между основаниями, а последовательность этих оснований и есть генетический код. Основание аденин обычно связывается с тиминном (А-Т), а основание цитозин — с гуанином (Ц-Г). Код воспроизводится при делении клетки, водородные связи рвутся, и две цепочки отделяются друг от друга — так образуется исходник для создания новых цепочек с участием ферментов клетки. В клетке есть устройства считывания последовательности оснований, их тройки (кодоны) транслируют состав одной аминокислоты, и при производстве белка они добавляются по мере роста цепочки (см. с. 128). Любую аминокислоту может кодировать несколько разных кодонов. К примеру, серин может быть добавлен к синтезируемой последовательности аминокислот белка, если «приборчик» трансляции считывает ТЦТ, ТЦЦ, ТЦА или ТЦГ.



Тайны ДНК начали приоткрываться в 1950-х, когда в течение всего пары лет исследования подтвердили, что, когда вирус заражает бактерию, передается генетический материал, и Джеймс Уотсон с Фрэнсисом Криком предложили двойную спираль как модель молекулы ДНК. Блистательный молодой химик-кристаллограф Розалинд Фрэнклин (см. с. 88) внесла свой вклад в понимание структуры этой молекулы, опубликовав статью с результатами исследования в журнале «Нейчер», хотя об этом часто забывают. Именно Фрэнклин, трудясь в Королевском колледже в Лондоне, сделала рентгеновские снимки ДНК, вдохновившие модель Уотсона и Крика. Коллега Фрэнклин Морис Уилкинс показал снимки Уотсону, не спросив у автора разрешения. А Фрэнклин при этом не пускали даже пообедать в одной комнате с учеными-мужчинами из ее лаборатории, и, если бы не поддержка матери и тети, отец не стал бы платить за ее обучение, поскольку не верил, что женщин имеет смысл допускать до университетского образования\*.

## СЛОВАРЬ ДНК

Установление структуры ДНК тем не менее разгадки не дало. Более полувека спустя после смерти Мишера от туберкулеза в 51 год было по-прежнему непонятно, как нуклеиновые кислоты порождают все разнообразие жизни на планете. Но после того как Уотсон, Крик и Уилкинс получили Нобелевскую премию в 1962 году, была вручена еще одна, в 1968-м, — Роберту Холли, Хару Гобинду Кхоране и Маршаллу Ниренбергу за расшифровку генокода: они продемонстрировали, как химическая структура ДНК транслируется в химическое устройство и сложный состав белков. Но и поныне, секвенировав весь геном человека, мы все еще пытаемся понять, что значит большая его часть.

## Нуклеотиды

ДНК-основание, сахар и фосфатная группа вместе называются нуклеотидом. Вообще-то в ДНК нуклеотиды называются дезоксирибонуклеотидами, потому что сахар, входящий в их состав, — дезоксирибоза. В РНК, одноцепочечную версию, которую клетки применяют при трансляции кода ДНК в белки, входит сахар рибоза, и нуклеотиды называются рибонуклеотидами. Олигонуклеотиды — короткие цепочки нуклеотидов, соединенных последовательно.

\* У этой истории есть несколько вариантов изложения, с разными исходами, хронологией и выводами.

## В сухом остатке:

## Химические копии шифра жизни



Многие из применяемых нами веществ, включая спасительные антибиотики и красители для тканей, из которых сшита наша одежда, позаимствованы у других биологических видов. Эти вещества получается извлекать напрямую, но, если удастся воссоздать биосинтетический процесс, его можно воспроизвести в лаборатории, химически или посредством суррогатных организмов — например, дрожжей.

**В** январе 2002 года группа южнокорейских ученых отправилась в лес Юсонгу в Тэджоне, Южная Корея, — собрать там образцы лесной почвы. Прогулявшись меж сосен, ученые взяли образцы почвенного покрова и рыхлой земли у корней деревьев. Их интересовала не сама почва, а миллионы микробов, обитающих в ней. Они искали бактерии, производящие любопытные вещества, еще неизвестные науке.

В лаборатории они экстрагировали ДНК этих микробов, а также микробов из леса в долине Чиндонга, и ввели случайные фрагменты этих ДНК в геном бактерии *E. coli* (кишечной палочки). Получившимся бактериям-мутантам создали хорошие условия для жизни, и ученые заметили нечто странное: некоторые бактерии получились пурпурные. Не этого исследователи ждали. Они хотели выявить бактерии, производящие антимикробные вещества, из которых потом можно было бы делать лекарства, — как в свое время Александр Флеминг, открывший пенициллин, первый антибиотик, полученный из пенициллиновой плесени.

Очистив пурпурный пигмент и подвергнув его разнообразным спектральным исследованиям, включая масс-спектрометрию

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1897**

Эрнест Дюшен обнаруживает, что плесень *Penicillium* убивает бактерии

**1909**

Химический анализ красителя «тирский пурпур»

**1928**

Александр Флеминг открывает (или перестраивает) пенициллин

и ЯМР (см. с. 84), ученые поняли, что и пигмент-то не новый. Как ни странно, они обнаружили индиго и индирубин, синий и красный красители, производимые обыкновенно растениями, а тут вдруг — бактериями.

## ПРИРОДНЫЕ ПРОДУКТЫ

Это интересный пример биосинтеза — синтеза природных продуктов, поскольку показывает, как совершенно разные биологические виды с далеких друг от друга ветвей эволюции производят одни и те же вещества. Австралийская красильная багрянка и многие другие морские моллюски тоже производят вещество, родственное синему индиго, — тирский пурпур, и его, как и индиго, с древних времен применяют для крашения тканей.

**ПРИРОДА, ПРЕМУДРЫЙ, ОДАРЕННЫЙ И ПЫЛКИЙ ХИМИК-КОМБИНАТОР, ВЛАДЕЕТ БЕСЧИСЛЕННЫМ МНОЖЕСТВОМ РАЗНООБРАЗНЫХ И НЕПРЕДСКАЗУЕМЫХ МЕТОДОВ, РАСПОЛАГАЕТ ИЗОБИЛИЕМ ПРИЧУДЛИВЫХ, НО ДЕЙСТВЕННЫХ СТРУКТУР...**

Янош Берди, химик-органик  
из Института исследования лекарств ИВАКС,  
Будапешт, Венгрия

Биосинтез — это любой биохимический синтетический процесс, часто многостадийный и не без участия ферментов, с помощью которого живой организм производит вещества. Химики, однако, именуют биосинтезом процессы, посредством которых получают полезные и/или коммерчески применимые естественные продукты. Пример — Флемингов пенициллин, а также индиго и тирский пурпур. Хотя индиго и пурпур ныне производятся промышленно, тирский пурпур по-прежнему извлекают из моллюсков, задорого. Чтобы произвести 1 грамм тирского пурпура, требуется 10 000 особей *Purpura lapillus*, и в 2013 году грамм этого красителя стоил ошеломительные 2440 евро. Есть много других примеров. Производители сыров «рокфор» и «стилтон» не одно столетие применяли естественные вещества, получаемые из *Penicillium roqueforti*, родственника пенициллиновой плесени.

Большинство природных продуктов, от антибиотиков до красителей, — вещества, именуемые вторичными метаболитами. Первичные метаболиты — соединения, которые организму нужны для поддержания

**1942**

Пациента (Энн Миллер) впервые лечат пенициллином от заражения крови

**2005**

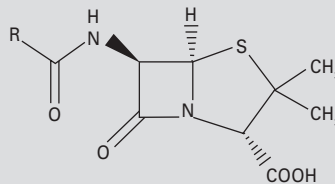
Число известных природных веществ достигает приблизительно 1 млн

**2013**

«Санофи» запускает производство антималярийного препарата артемизинина

## Как из хлебной плесени получается пенициллин?

Вид плесени, из которой Александр Флеминг выделил пенициллин, называется *Penicillium notatum*. Этот вид с удовольствием обитает у вас на батоне или буханке. Флеминг с коллегами много лет пытались понять, как заставить плесень вырабатывать столько вещества, чтобы хватило на производство лекарств и лечение пациентов. Отчасти трудность состояла в очистке, но постепенно стало понятно, что этот конкретный вид плесени попросту не производит вещество в нужном количестве. Ученые взялись искать среди похожих штаммов, какой даст выход побольше, и наконец обнаружили подходящий — этот живет на дыне-канталупе, *Penicillium chrysogenum*.



Структура пенициллина (R варьирует)

Подвергнув эту плесень разнообразным мутагенным процедурам (рентгеновскому облучению, например), ученые получили разновидность, способную производить в 1000 раз больше вещества, чем было получено впервые, и этот штамм эксплуатируют и поныне.

жизни, например белки и нуклеиновые кислоты, а во вторичных метаболитах на первый взгляд, нет очевидной нужды (разумеется, во многих случаях мы пока попросту не знаем, в чем функция этих веществ).

Многие вторичные метаболиты — мелкие молекулы, производимые специфическими организмами, и потому интересно обнаружить, что химически похожие пигменты производятся и растениями, и моллюсками, и бактериями. Никто не знает, зачем бактерии, обитающие в корейских лесах, производят синий и красный пигменты, и в точности так же непонятно, зачем их вырабатывать австралийским моллюскам.

## БАКТЕРИИ ПРОТИВ БАКТЕРИЙ

По приблизительным оценкам, со времен открытия Флемингом пенициллина в 1928 году из широкого диапазона природного сырья было выделено свыше миллиона различных веществ. Многие из полученных соединений обладают антибактериальным действием. Бактерии почвы, вроде тех, что добыли корейские ученые, — богатый источник антибиотиков. Считается, что живые бактерии производят их как химическое оружие против других бактерий в войне за пространство обитания и пищу, а также, возможно, для коммуникации друг с другом. Поиск новых антибиотиков со временем

сделался заполошным — возникли новые штаммы стойких к лекарствам микробов, например *Mycobacterium tuberculosis*, устойчивый сразу ко многим антибиотикам. Таким образом, микроорганизмы, похоже, по-прежнему лучшие источники препаратов от микробов.

У химиков есть принцип: если понятно, как вещество делается в природе, можно воспроизвести этот процесс или даже его усовершенствовать. Солидная часть лабораторного времени посвящена выяснению механизмов биосинтеза, которые растения, бактерии и другие организмы применяют для создания нужных им веществ. Так произошло с синтетическим антималярийным препаратом артемизинином. Природный источник — полынь однолетняя, но само растение не умеет производить это вещество в количествах, необходимых для лечения миллионов зараженных в год. И потому химики взялись разобраться в биосинтетическом механизме, а также в генах и ферментах, в нем задействованных. Им удалось создать дрожжи, у которых получается синтезировать это вещество. Фармацевтическая компания «Санофи» объявила, что собирается распространять «полусинтетический» артемизинин некоммерчески.

Интересно, что механизмы биосинтеза, приводящие к пурпурным и синим красителям в природе, так до сих пор толком и не поняты, хотя сами продукты применяются не первую тысячу лет. Это подтолкнуло к предположению, что эволюционное совпадение, приведшее к тому, что разные организмы производят очень похожие вещества, на самом деле вовсе не совпадение. Оказывается, внутри железы моллюска, из которой добывают тирский пурпур, есть еще одна железа, битком набитая бактериями. Это пока все еще теория, но, вероятно, пурпурные микробы, подобные тем, что нашлись в корейских лесах, обжили железы морских моллюсков.

## Тирский пурпур

Краситель «тирский пурпур» много веков применялся для окраски тканей, из которых изготовляли облачения знати и тех, кому это было по карману, а его химический состав выяснили сравнительно недавно. В 1909 году немецкий химик Пауль Фридляндер разжился 12 000 шипастых морских ракушек *Bolinus brandaris* и смог выделить из их гипобранхиальных желез 14 граммов пурпурного пигмента. Фридляндер промыл, очистил и кристаллизовал пигмент, а затем проделал его элементный анализ и получил формулу  $C_{16}H_8Br_2N_2O_2$ .

**В сухом остатке:**

**Природный конвейер**

# 37

## ФОТОСИНТЕЗ

У растений в активе есть ловкий трюк: они научились извлекать энергию из света. Фотосинтез — источник не только энергии, которую мы потребляем с пищей, но и жизненно необходимого нам вещества — кислорода.

**М**иллиарды лет назад атмосфера нашей планеты была удушливой смесью газов, которой мы, окажись там в те поры, дышать бы не смогли. В той смеси было гораздо больше диоксида углерода, чем ныне, а вот кислорода почти никакого. Отчего же ситуация изменилась?

Ответ прост: растения и бактерии. Более того, есть предположение, что первыми организмами, отдавшими кислород в атмосферу, могли быть предки цианобактерий — вольно плавающего планктона, который часто называют синезелеными водорослями. Согласно теории, тот планктон, производивший кислород фотосинтезом, постепенно превратился в органеллы хлоропласты внутри растительных клеток, где и протекает фотосинтез. Растения захватили планету благодаря своим рабам — цианобактериям и накачали громадные объемы кислорода в атмосферу. Атмосфера постепенно сделалась пригодной для того, чтобы у наших предков развилась дыхательная система. Растения создали условия, в которых способен жить человек.

### ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Впрочем, растениям рабы-цианобактерии нужны были не потому, что последние умели производить кислород. Важный продукт фотосинтеза с позиций растения — сахар, вещество-топливо, форма хранения энергии в химическом виде. На каждые шесть молекул

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1754**

Шарль Бонне замечает, что из зеленых листьев под водой выделяются пузырьки газа

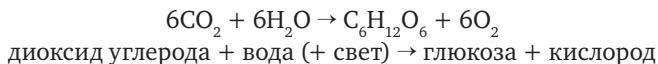
**1845**

Юлиус Роберт Майер заявляет, что «растения превращают энергию света в химическую»

**1898**

В оборот входит понятие «фотосинтез»

кислорода, производимого хлоропластом, производится одна молекула глюкозы.



Это уравнение — лишь конспект процесса фотосинтеза, суммарная реакция, а на самом деле процессы, происходящие в хлоропласте, куда мудренее. Зеленый пигмент хлорофилл, придающий листьям растений и цианобактериям их окраску, — главный элемент фотосинтеза. Он поглощает свет, а тот запускает передачу энергии от одной молекулы к другой. Растения зеленые потому, что хлорофилл поглощает свет всего видимого спектра, кроме зеленой его части, то есть зеленый свет отражается, и мы его видим.

**ПРИРОДА ПОСТАВИЛА ПЕРЕД СОБОЙ ЗАДАЧУ УЛАВЛИВАТЬ СВЕТ, ЛЬЮЩИЙСЯ НА ЗЕМЛЮ, И ЗАПАСАТЬ САМУЮ ПРИЗРАЧНУЮ ИЗ ВСЕХ ФОРМ ЭНЕРГИЙ В ОСЯЗАЕМОМ ВИДЕ**

Юлиус Роберт Майер (1814–1878),  
немецкий врач, естествоиспытатель

## ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Свет, достигнув хлоропластов, отдает им энергию. Ее улавливают одни молекулы хлорофилла (фотосинтетические антенны) и передают другим, расположенным в фотосинтетических центрах в хлоропластах. Происходит излучение электронов в этих молекулах, и начинается каскадная реакция: электроны несутся от одной молекулы к другой, как в игре «в картошку». Эта окислительно-восстановительная цепная реакция (см. с. 52) венчается синтезом молекул НАДФ и АТФ, которые ведут реакции производства сахаров. По ходу дела расщепляется вода и получается кислород, которым мы дышим.

Непросто — да и, в общем, не очень нужно — запоминать все молекулы, участвующие в передаче электронов, однако место, где все это происходит, очень важно. Реакции протекают в агрегатах молекул, называемых фотосистемами и расположенных в хлоропластах, которые когда-то были цианобактериями. В ходе процесса получающиеся ионы водорода

**1955**

Мелвин Калвин с коллегами прослеживают путь, который проходит атом углерода в процессе фотосинтеза

**1971**

Первое вскрытие фотосистемы — белкового комплекса, обеспечивающего фотосинтез

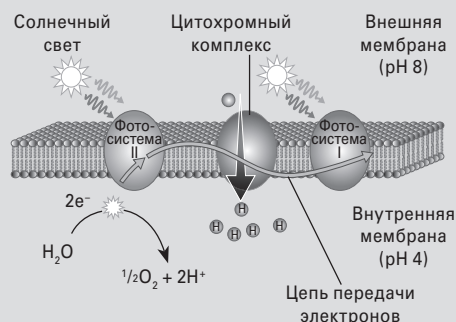
**2000**

Впервые опубликован растительный геном

## Фотосистемы I и II

Есть два типа белковых комплексов, связанных с фотосинтезом у растений: в первом производится кислород, во втором — энергосносители НАДФ и АТФ. Эти комплексы, по сути крупные ферменты, именуются фотосистемами I и II. Как ни парадоксально, проще начать со второй. В этой фотосистеме специализированная пара хлорофилловых пигментов под названием P680 приходит в возбуждение и выкидывает электрон, тем самым обретая положительный заряд. В таком возбужденном состоянии P680 способна принимать электроны извне, что и происходит: P680 забирает их у кислорода воды, и кислород высвобождается в виде газа. Фотосистема I принимает электроны, отданные фотосистемой II, а также от своих светопоглощающих молекул хлорофилла. Специализированная пара хлорофилловых

пигментов в этой системе называется P700, и она тоже излучает электроны и начинает другую цепь электронной передачи. Наконец, все эти электроны направляются к белку ферредоксину, который восстанавливает НАДФ<sup>+</sup> до передатчика химической энергии — НАДФ.



(протоны) собираются по одну сторону мембраны. Затем их пропихивают на другую сторону с помощью белка — того самого, который использует энергию перехода протона сквозь мембрану для производства АТФ.

## ФИКСАТОРЫ УГЛЕРОДА

Химическая энергия (АТФ и НАДФ), производимая в хлоропластах, питает реакционный цикл, в котором углекислый газ воздуха превращается в сахара: углерод из углекислого газа входит в состав углеродных скелетов в молекулах сахаров. Такой процесс фиксации углерода спасает нашу атмосферу от полной загазованности углекислым газом (диоксидом углерода). И этот же процесс обеспечивает растения сахаристым топливом, которое они используют для питания клеток или превращают в крахмал, про запас.

Вам может обоснованно показаться, что растениям диоксид углерода в атмосфере совсем не лишней, и так бы оно и было, если бы менялись только концентрации углекислого газа в воздухе, но дело в том,

что не одно это меняется — поднимается и температура атмосферы в целом. С учетом всех условий ученые полагают, что рост растений, видимо, замедлится, а не ускорится.

### ЛУЧШЕ ЭВОЛЮЦИИ

Растения вполне успешно добывают энергию из света, производя глюкозу со скоростью миллион молекул в секунду. Но если вспомнить, что у них на совершенствование этого процесса были миллионы лет эволюции, процесс выходит не слишком-то эффективным. Если сравнить общую сумму энергии, переносимой фотонами света, которые обеспечивают фотосинтез, с количеством продукта в виде глюкозы, разница окажется чувствительная. Посчитав всю энергию, теряемую по пути или расходуемую на ведение реакций, эффективность получится процентов пять. Более того — это максимум, а в среднем КПД даже ниже.

Может ли человек, проживший на планете менее миллиона лет, придумать что-то получше? Можем ли мы извлекать энергию из солнечного света и превращать ее в топливо эффективнее, чем растения? Именно этим ученые и занимаются, пытаясь решить наши энергетические проблемы. Помимо солнечных батарей (см. с. 172), есть мысль об искусственном фотосинтезе (см. с. 201) — разложении воды, как это делают растения, но для того, чтобы получать в этом процессе водород как топливо или же как промежуточный продукт в его производстве.

### Энергия без солнечного света

В конечном счете вся энергия на планете происходит от Солнца и улавливается растениями, которые формируют основание пищевой пирамиды. Растения и бактерии — автотрофы, то есть сами производят себе пищу (сахара) и используют ее как источник энергии. На дне океанов между тем света для фотосинтеза нет, и там обитают другие автотрофы — хемосинтезирующие бактерии, они извлекают энергию из веществ — например, из сероводорода.

## В сухом остатке:

## Растения творят энергию из света



# Химические посредники

Человечество для общения применяет язык и речь, но еще до того, как мы сами научились говорить, наши клетки уже общались между собой. Они шлют друг другу сообщения из одной части тела в другую и передают нервные сигналы, благодаря которым мы можем двигаться и думать. Как они это делают?

**К**летки вашего организма живут не отдельно друг от друга. Они постоянно общаются, сотрудничают и координируют свои действия в вашу пользу, чем бы вы ни занимались. И осуществляют они это посредством химических веществ.

Гормоны контролируют развитие вашего тела, аппетит, настроение и отклики на опасность. Гормоны бывают стероидные — например, тестостерон и эстроген, или белковые — инсулин, допустим. Сигнальные молекулы — часть иммунной системы, они вовлекают клетки, которые помогают вам побороть простуду или грипп, но, вероятно, наиболее впечатляющий пример того, как в человеческом организме работают химические посредники, — ваше мышление и движения, от малейшего трепета век до физической победы в марафоне. Все это — результаты химических сообщений, именуемых нервными импульсами.

## НЕРВНЫЕ НАЧИНАНИЯ

Не так давно ученые по-прежнему ломали копыя на тему природы нервных импульсов. Еще в конце 1920-х самой распространенной теорией была электрическая, а не химическая.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1877**

Эмиль дю Буа-Раймон размышляет, электрическая природа у нервного импульса или химическая

**1913**

Хенри Дейл открывает ацетилхолин, первый нейромедиатор, известный человеку

**1934**

Исследование растительных гормонов начинается с этилена, обуславливающего созревание яблок и груш

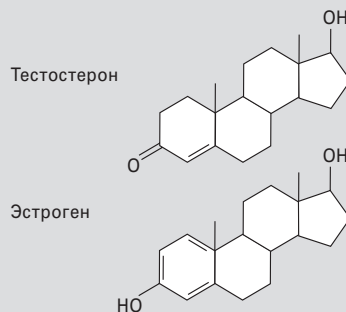
Нервы обычных лабораторных животных исследовать непросто, поскольку они очень хрупкие, и потому английские ученые Ален Ходжкин и Эндрю Хаксли решили обратить внимание на зверя покрупнее — кальмара. Хотя нервные волокна у кальмара всего 1 мм в диаметре, мышечные нервы этого головоногого все же примерно в сто раз толще, чем у лягушек, с которыми ученые работали прежде. В 1939 году Ходжкин и Хаксли принялись за исследование потенциала действия — разницы потенциалов между внутренним пространством нервной клетки и внешней средой: осторожным введением электрода в нервное волокно кальмара они обнаружили, что в момент передачи импульса потенциал действия куда выше, чем в состоянии покоя.

Однако лишь после Второй мировой войны, отсрочившей эти исследования на несколько лет, Ходжкин и Хаксли наконец смогли продолжить изучение потенциала действия. Их открытия помогли нам понять, что «электрические импульсы», перемещающиеся вдоль нерва, — результат движения ионов вдоль внутренней и внешней поверхности клетки. Ионные каналы (см. с. 155) в мембране нервной клетки позволяют ионам натрия, когда приходит импульс, проникать внутрь, а ионам калия, когда импульс уходит, — наружу.

Как же импульсы передаются от одной нервной клетки к другой, образуя релейную цепь, которая способна транслировать сообщения? «Сообщение» в данном случае — цепочка

## Половые гормоны

Тестостерон и эстроген — стероидные гормоны, их молекулы за многое отвечают в организме, от метаболизма до полового развития. Хотя эти гормоны, как всем известно, играют важную роль в различиях физиологии и внешнего вида самцов и самок, устройство тестостерона и эстрогена поразительно похоже. Обе молекулы состоят из четырех кольцевых структур и отличаются лишь в одном месте. Хотя тестостерон считается «мужским» гормоном, у мужчин его просто вырабатывается больше, а в женском теле из него синтезируется эстроген, потому молекулы этих веществ так близки по устройству. Что интересно, концентрация тестостерона у женщин выше всего по утрам и в течение дня меняется — меняется и в течение месяца, в точности так же, как содержание традиционно «женского» гормона.



**1951**

Джон Экклз доказывает, что передача импульсов в ЦНС — химическая

**1963**

Джон Экклз, Ален Ходжкин и Эндрю Хаксли получают Нобелевскую премию за изучение ионной природы нервного импульса

**1981**

Из морской бактерии впервые выделено вещество, отвечающее за чувство кворума

**1998**

Родерик Маккиннон составляет трехмерную модель структуры ионного канала нерва

химических реакций, одна начинается другую, как в игре в «сломанный телефон», но с бешеной прытью. Передача нервного импульса следующей клетке требует от вещества, именуемого нейромедиатором (посредником), проскочить синаптическую щель и прикрепиться к мембране принимающей клетки, откуда исходит следующий импульс. Такие цепи химической передачи транслируют сигналы от мозга до кончиков пальцев и всюду в промежутке.

Со времен открытия нейромедиаторов, начиная с ацетилхолина в 1913 году, мы успели разобраться, какую роль эти молекулы-посредники играют в мозговой деятельности, где они обеспечивают срабатывание 100 миллиардов нервных клеток. Профилактика и лечение болезней мозга основаны

**ГИТЛЕР ВОШЕЛ  
В ПОЛЬШУ, ОБЪЯВИЛ  
ВОЙНУ, А МНЕ ПРИШЛОСЬ  
БРОСИТЬ МЕТОДИКУ НА  
ВОСЕМЬ ЛЕТ, ПРЕЖДЕ ЧЕМ  
Я СМОГ ВЕРНУТЬСЯ  
В ПЛИМУТ В 1947-М**

Ален Ходжкин (1914–1998),  
британский нейрофизиолог,  
биофизик об исследовании  
нервных импульсов у кальмара

на представлении о химической природе нейрофизиологических расстройств. При депрессии, например, такая химическая причина — в нейромедиаторе серотонине, и антидепрессант прозак, разработанный в 1987 году, как считалось, повышает концентрацию серотонина в мозге, что, впрочем, по-прежнему спорно.

### ПОТОЛКУЕМ ПРОМЕЖ СОБОЮ

Однако услугами химических посредников пользуются не только люди и другие животные. В любом многоклеточном организме клеткам нужны способы «разговаривать» между собой. У растений, положим, нервов нет, зато гормоны они производят. Примерно тогда же, когда физиологи совершали свои великие

прорывы в исследовании нервных импульсов, исследователи растений открыли, что этилен (то же вещество, из которого мы делаем полиэтилен, см. с. 160) не просто помогает фруктам дозреть, он еще и активно вовлечен в процессы роста растения. Это вещество производится большинством растительных клеток и, как многие животные гормоны, передает сигналы, активируя молекулы-рецепторы на клеточных мембранах. Ученые все еще разбираются в хитросплетениях этого воздействия на развитие растений и уже открыли, что этилен в одиночку способен активировать тысячи разных генов.

Даже у бактерий, о которых все привыкли думать как об одиночках, клетки обязаны сотрудничать, а поскольку микробы в общении не могут полагаться на язык или повадки, они общаются посредством химических

веществ. Лишь за последние примерно десять лет ученые открыли, что среди бактерий это универсальный навык. Вообразите, что происходит, когда вы хвораете. Одна крошечная бактерия вас, скорее всего, с ног не свалит. Но тысячи или миллионы их, атакующие вас слаженно, — совсем другое дело. Как же они строят план захвата и стягивают армии? С помощью химических веществ, а точнее, веществ, отвечающих за чувство кворума. Молекулы этих веществ и соответствующие им рецепторы дают бактериям одного вида возможность общаться. Вещества, распознаваемые за пределами отдельного вида, — своеобразный «химический эсперанто» — обеспечивают общение между микробами разных видов.

Бесчисленное множество способов общения между клетками — фундаментальное свойство живого. Без сигнальных веществ ни многоклеточные, ни одноклеточные организмы не смогли бы действовать сообща. Любая клетка была бы тогда островом, обреченным на одинокую жизнь и смерть.

### Ионные каналы

Химик Родерик Маккиннон получил Нобелевскую премию по химии 2003 года за применение рентгеноструктурного анализа (см. с. 88) в представлении трехмерной структуры калиевых каналов. Это помогло ученым разобраться, как устроена селективность ионных каналов: почему канал определенного типа пропускает один тип ионов (калия), а другого (натрия) — нет.

**В сухом остатке:**

**Клетки общаются веществами**

# 39 Бензин

Автовождение подарило нам свободу жить и работать, как нам нравится. Где б мы были без нефти и достижений в очистке бензина? Но бензин — топливо, которое, вероятно, сильнее всего повлияло на изменения климата и на загрязнение атмосферы Земли.

**В**усредненный день 2013 года жители США потребляли девять миллионов баррелей бензина. Допустим, дело было 1 января. На следующий день, 2 января, США потребили еще девять миллионов баррелей, то же — и третьего. Так прошло 365 дней, пока за год не вышло более трех миллиардов баррелей — и это в одних лишь США.

Основную часть этого умопомрачительного объема слопали двигатели внутреннего сгорания автомашин, которые совокупно проехали за это время 4,8 триллиона километров. Теперь представьте, что всего 150 лет назад никаких машин не было (не считая паровых), бензиновый двигатель внутреннего сгорания еще даже не изобрели, а первая нефть всего лет пять как была добыта. Расцвет автомоторов на бензине превзошел даже самые смелые ожидания.

## ЖАЖДА ТОПЛИВА

Даже в начале XX века в США было всего 8000 зарегистрированных автомобилей, и все они ползали на скорости ниже 32 км/ч. Но нефтяная лихорадка уже началась, и нефтяные магнаты вроде Эдварда Дозни — он стал прототипом персонажа, которого сыграл Дэниэл Дей-Льюис в фильме «Нефть» (2007), — уже начали сколачивать свои миллионы. «Панамериканская нефтяная и транспортная компания» Дозни в 1892 году пробурила в Лос-Анджелесе первую в США скважину. К 1897-му их уже было 500.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1854	1846	1880	1900
Основана «Пенсильванская нефтяная компания», добывает нефть шахтным способом	Бурение первой нефтяной скважины (Баку)	Первый бензиновый двигатель внутреннего сгорания	В США зарегистрировано 8000 автомобилей

Потребность в бензине росла быстрее, чем знание о нем химиков. В 1923 году Карл Джонс из компании «Стэндэрд Ойл», Нью-Джерси, писал в журнал «Промышленная и инженерная химия», что в этой области ведется прискорбно мало исследований. Меж тем голливудские звезды и нефтяные миллионеры, в том числе и Доэни, катались на дорогих автомобилях. Сын Эдварда Нед купил своей жене машину, спроектированную в мастерских «Эрл Отомобайл». Она была стального серого цвета с кожаным красным салоном и лампами от «Тиффани». Главный дизайнер «Эрл Отомобайл» позднее присоединился к «Дженерал Моторз», возглавил там отдел декора и цвета и разработал стили «кадиллака», «бьюика», «понтака» и «шевроле».

**НАХОДИЛ Я ЗОЛОТО, НАХОДИЛ И СЕРЕБРО... НО Я ПОНЯЛ, ЧТО ЭТА МЕРЗКАЯ НА ВИД СУБСТАНЦИЯ — КЛЮЧ К КОЕ-ЧЕМУ КУДА БОЛЕЕ ЦЕННОМУ, ЧЕМ ЭТИ МЕТАЛЛЫ**

Эдвард Лоренс Доэни (1856–1935),  
американский нефтяной магнат

## ПЫЛКИЕ АМБИЦИИ

Благодаря возрастающему спросу на автомобили и решимости Генри Форда удовлетворить его при помощи конвейерного массового производства автозаправки начали возникать возле проезжих дорог по всей стране. Развитие процессов очистки нефти, в том числе и крекинга (см. с. 60), вскоре позволило производителям бензина добиваться качественных смесей горючего, на котором моторы работали глаже.

Горючее в бензобаке вашей машины сегодня содержит сотни различных веществ, в том числе и смесь углеводородов, а также добавки против детонации, ржавчины и замерзания. Углеводороды — понятие растяжимое и покрывает собой громадное множество линейных, разветвленных, циклических и ароматических соединений. Химический состав компонентов бензина отчасти зависит от того, где добыли исходную нефть. Сырая нефть в разных точках планеты имеет разные свойства, а еще разные нефти смешивают между собой.

**1913**

Компания «Форд Моторз» начинает конвейерное производство автомобилей

**1993**

Вступают в силу европейские стандарты выхлопа пассажирских автомобилей («Евро-1»)

**2004**

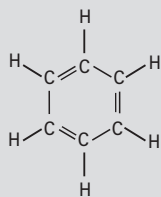
Количество зарегистрированных дорожных автомобилей в США — 226 000 000

**2014**

Вступают в силу стандарты «Евро-6»

**Бензол**

Бензол — циклический углеводород, получаемый в процессе очистки сырой нефти. Это важное для промышленности вещество — оно применяется при производстве пластмасс и лекарств. Бензольное кольцо из шести углеродных атомов — устойчивая конструкция, входит в состав громадного числа природных и синтетических веществ под названием «ароматические углеводороды». Парацетамол и аспирин, равно как и корица и ванилин — примеры ароматических веществ, производных бензола. Бензол сам по себе — канцероген, и его содержание в бензине строго контролируется — во избежание опасных выбросов в атмосферу. Улучшение качества катализаторов дожигания сыграло важную роль в уменьшении бензольного выхлопа.

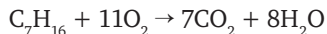


Бензол  
(формула Кекуле)



Бензольное кольцо  
(упрощенное изображение)

В двигателе внутреннего сгорания бензин горит на воздухе, то есть горение происходит с участием кислорода, в результате получается диоксид углерода. Например:



гептан + кислород → диоксид углерода + вода

Это пример реакции окисления-восстановления (см. с. 52), поскольку атомы углерода в гептане окисляются, а кислород восстанавливается.

**НЕЗАДАЧА С ВЫХЛОПОМ**

Всего несколько десятков лет назад в бензин, чтобы он не детонировал прежде, чем доберется до рабочих частей двигателя, добавляли тетраэтилсвинец, и благодаря этому сгорание топлива происходило эффективнее. Но добавка тетраэтилсвинца сообщала выхлопу дополнительную ядовитость: тетраэтилсвинец реагировал с другой добавкой, 1,2-дибромэтаном, который не позволял свинцу скапливаться в двигателе, в результате получался вредный бромид свинца. Бензин со свинцовой присадкой начали вытеснять уже в 1970-х, а производители бензина взялись искать способы получения гладко горящего высокооктанового топлива, на литре которого можно было бы проехать больше километров.

Помимо этой беды, по мере шквального развития автомобильной промышленности в XX веке возникла и другая: выхлоп углекислого газа

в атмосферу попросту зашкалил. Концентрации других загрязнителей тоже подскочили, поскольку энергия, генерируемая двигателем автомобиля, втягивает в реакцию и другие компоненты воздуха. Азот реагирует с кислородом, получается смесь оксидов азота, от которых образуется смог и происходят всякие легочные заболевания. Примерно половина всех азотокислых выбросов — из-за автотранспорта.

## ХИМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Сокращение выхлопа стало у производителей автомобилей приоритетом, им приходится подчиняться все более строгим нормативам. Промышленники обдумывают возможности электрических и гибридных машин, но решения по-прежнему требуются и для обычного бензинового (и дизельного) автотранспорта. Трех миллиардов баррелей бензина, сжигаемых ежегодно в одних только США, хватит, чтобы заполнить двести тысяч олимпийских бассейнов. На каждого американца приходится по 3,8 литра бензина в день. Катализаторы для конвертеров, ловушки для оксидов азота и другого выхлопа — активнейшие области химических исследований.

С развитием химии стало возможно производить более эффективные топлива, что, в свою очередь, позволило водящим автомобиль путешествовать дальше и дешевле. Ныне химии приходится иметь дело с последствиями: атмосфера задыхается от выхлопных газов, а ресурсы, благодаря которым мы катаемся туда и сюда ежедневно, истощаются.

### Октановое число

Октановое число бензиновой смеси или отдельного компонента бензина — мера эффективности горения. Октановое число измеряется по сравнению с 2,2,4-триметилпентаном (его по старинке называют «изооктаном»), октановое число которого приравнивают к 100, и с гептаном, у которого октановое число — ноль. Компоненты бензина с низким октановым числом обычно и «стучат» в двигателе — детонируют.

**В сухом остатке:**  
**Топливо, изменившее мир**



**Как мы вообще жили до изобретения пластмассы? В чем таскали продукты домой? Из чего ели чипсы? Из чего все было сделано? Как ни поразительно, те времена — не такие уж давние.**

**К**огда картофельные чипсы только начали производить массово, их продавали в жестянках, воощенных бумажных пакетах или иногда в здоровенных баках, из которых ими торговали вразвес. В наши дни покупать чипсы удобнее и гигиеничнее — они теперь в пластиковой упаковке, как и многое из магазинной еды.

Первая американская компания, начавшая торговать чипсами, основана в 1908 году, через год после изобретения полностью синтетического пластика бакелита. Бакелит — янтарно-желтая смола, получаемая взаимодействием двух веществ — фенола и формальдегида. Поначалу этот материал использовали налево и направо, от корпусов радиоприемников до шаров для игры в бильярд. Музей бакелита в Сомерсете (Англия) экспонирует даже бакелитовый гроб. Это реактопласт, то есть если уж он принял определенную форму, то раз и навсегда, нагреванием ее не изменишь.

В течение нескольких десятилетий возникло множество других пластиков, в том числе и разнообразные термопласты, то есть пластмассы, которые можно переплавлять. Считалось, что эти новые стойкие материалы состоят из плотно упакованных короткоцепочечных молекул, однако в 1920-е годы немецкий химик Герман Штаудингер выдвинул предположение о «макромолекулах» и о том, что пластмассы состоят из длинных полимерных цепочек (см. с. 16).

## МАТЕРИАЛ С ТЫСЯЧЕЙ ПРИМЕНЕНИЙ

Девиз компании «Бакелит»

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

3500 до н. э.	1900	1907	1922
Из «природных пластмасс» (черепаховых панцирей) египтяне изготавливают грести и браслеты	Понятие о полимерах	С бакелита, первого полностью синтетического материала, начинается эра пластика	Герман Штаудингер предполагает, что пластмассы состоят из длинноцепочечных молекул

## ЭРА ПЛАСТИКА

В 1950-х годах появился полиэтиленовый пакет — самый вездесущий продукт пластмассовой эпохи. Эра пластика уже была в разгаре. Вскоре чипсы и другие продукты питания начали продавать в пластиковой упаковке, и еда на неделю прибывала в дома, вся упакованная в этот материал.

Процесс создания полиэтилена сложился благодаря случайному открытию британских ученых из «Импириэл Кемикл Индастриз» (ИКИ) в 1931 году: нагреванием этилена под высоким давлением получается полиэтилен, полимер этилена. Этилен — продукт химического крекинга сырой нефти (см. с. 60), и потому большая часть полиэтилена восходит к нефтехимии. Однако этилен, а значит, и полиэтилен можно делать из возобновимых материалов, в том числе химической конверсией спирта, производимого из растений, — например, из сахарного тростника.

Большинство полиэтиленовых пакетов сделано из полиэтилена низкой плотности (ПЭНП), производимого при высоком давлении, как в процессе ИКИ. Полимерные цепочки в ПЭНП прямые, тогда как в полиэтилене высокой плотности (ПЭВП), производимом при низком давлении, есть разветвленные молекулы, и материал поэтому крепче.

## Природные пластмассы

Природные материалы, которые ведут себя как пластмассы, иногда именуют природными пластмассами. К примеру, рога животных и панцири морских черепах можно нагреть и придать им желаемую форму, как пластмассе. Вообще-то эти материалы устроены совсем не как пластики. Они состоят преимущественно из белка кератина — того же, что слагает наши волосы и ногти. Но, как и пластмассы, кератин — полимер из множества повторяющихся звеньев. Поскольку многие из таких природных материалов продавать в наше время незаконно, черепаховые панцири, из которых когда-то делали гребни для волос и другие украшения, почти целиком заменили синтетической пластмассой. Первая имитация черепаховой кости была изготовлена из целлулоида, полусинтетического материала, изобретенного в 1870 году; он же с пользой заменил слоновую кость, из которой вытачивали бильярдные шары. Он, правда, легко возгорался — до такой степени, что его вскоре пришлось заменить несколько менее воспламеняющимся «безопасным целлулоидом». Ныне черепаховую кость заменяют новые полимеры — полиэстер, например.

**1931**

Случайное открытие полиэтилена

**1937**

Коммерческое производство полистирола

**1940**

В Великобритании начато коммерческое производство ПВХ

**1950-е**

Появились полиэтиленовые пакеты

**2009**

«Боинг-787» на 50% состоит из пластмассы

## ОБОРОТНАЯ СТОРОНА ЖИВУЧЕСТИ

Начнем с того, что над экологическими последствиями всевозрастающего производства пластмасс никто, в общем, не задумывался. Пластмассы же химически инертны, живут долго и вроде ни с чем в окружающей среде не взаимодействуют. Однако подобное отношение привело к невероятному объему пластиковых отходов. В северной части Тихого океана существует огромная «мусорная воронка», состоящая преимущественно из пластика. По оценкам, каждый квадратный километр воды в этом районе содержит около трех четвертей миллиона единиц микропластика — мелких кусочков пластмассы, которые рыба может принять за планктон.

Многие пластики не поддаются разложению в природе, они крошатся и образуют микропластик. На суше эти гранулы забивают внутренности птицам и млекопитающим. Полиэтилен — один из самых нерушимых в естественных условиях. «Зеленый» полиэтилен, сделанный из тростникового сахара, — примерно такой же. И все же взгляды на биоразлагаемость у химиков и микробиологов начали несколько меняться.

## МИКРОБЫ, ПИТАЮЩИЕСЯ ПЛАСТИКОМ

Полиэтилен обживаетея в окружающей среде по одной простой причине: его не берут бактерии. Все благодаря его устройству: он состоит целиком из углеводородных цепочек и не содержит химических групп, с которыми могли бы взаимодействовать бактерии. Микробы вступают в контакт с кислородсодержащими группами (например, карбонильными —  $C=O$ ), и потому окисление при нагревании и с участием катализатора или даже солнечного света, то есть фотоокисление, — один из способов превращения полиэтилена в более удобоваримую для микробов форму. Другой вариант — поискать специфические бактерии, которые можно не «баловать» кислородсодержащими группами.

Найдены бактерии и грибы, вырабатывающие ферменты, способные разлагать или «разъедать» пластмассы. Некоторые могут расти прямо в пленках на поверхности полиэтилена, используя их как источник углерода для своего метаболизма. В 2013 году индийские ученые сообщили, что обнаружили три разных вида морских бактерий в Аравийском море, которые способны разлагать полиэтилен без предварительного окисления. Лучшее из всех зарекомендовал себя в этом смысле подвид *Bacillus subtilis*, микроорганизм, широко распространенный в почве и в кишечнике у человека. Меж тем в одной лишь Индии ежегодно потребляют 12 миллионов тонн пластмасс, и десятки тысяч тонн пластика уходят в отходы ежедневно.

## Биопластики

Понятие «биопластик» несколько путаное. Иногда так обозначают полимеры, сделанные из возобновимых материалов, например растительную целлюлозу, и тогда точнее было бы называть их «пластики биологического происхождения». А иногда этим словом называют биоразлагаемые пластмассы. Полилактид (ПЛА) делается из растительного материала и разлагается в природе. Однако не все пластики биологического происхождения разлагаются в окружающей среде. Полиэтилен можно произвести из растительного сырья, но он необычайно стоек к биоразложению.



Упаковка от чипсов зачастую не подлежит переработке из-за того, что на нее нанесен слой металла — ради «пушей свежести»: он не пропускает кислород. Вам либо нужно вручную шинковать такую упаковку в мелкую труху, либо создавать из нее дизайнерские наряды и инсталляции, в противном случае она отправится на свалку. И все же пластик, часто применяемый для упаковки чипсов, — полипропилен, и в 1993 году итальянские химики разработали способ растить на полипропилене бактерии, добавляя к нему лактат натрия и глюкозу. Теоретически мы, возможно, отыщем бактерии, которые станут есть и нашу упаковку от чипсов, и все остальные пластиковые отходы. Но по-крупному разобраться с отходами можно, все-таки сократив объем используемой пластиковой тары.

**В сухом остатке:**  
**Многоцелевые**  
**загрязняющие полимеры**

Много лет хлорфторуглероды считались безопасной альтернативой ядовитым газам, поначалу применявшимся в холодильных системах. Одна беда: ХФУ разрушают озоновый слой. Но прежде чем мы осознали эту беду во всей полноте, озоновая дыра расплзлась до размеров континента. Коммерческое использование низших ХФУ официально запрещено с 1987 года.

**Х**олодильники в наших домах обитают меньше века, но успели стать совершенно неотъемлемой частью быта, и мы воспринимаем их как должное. Выпить стакан холодного молока мы можем когда пожелаем, и этот тихо гудящий в углу ящик вдохновил людей на многие кулинарные шедевры — взять, к примеру, канадский десерт «Нанаймо», который даже печь не надо. В 2012 году Королевское научное общество объявило холодильник важнейшим изобретением в истории кулинарии.

Конечно, нет нужды набивать кладовку через день, и все же нет-нет да и обнаружится где-нибудь на задах вашего холодильника нечто неаппетитное. А если речь не о тухлом латуке, а о дыре в озоновом слое размером с материк?

Теперь-то мы знаем, что газы, ответственные за разрушение озонового слоя, — ХФУ, хладагенты, разработанные на замену газам, которые применялись в холодильниках в первой половине XX века. Эти вещества содержат хлор и под действием солнечного света выпускают вредоносные радикалы хлора в атмосферу. До ХФУ

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1748**

Первая демонстрация холодильника

**1844**

Джон Горри строит «машинку для льда»

**1928**

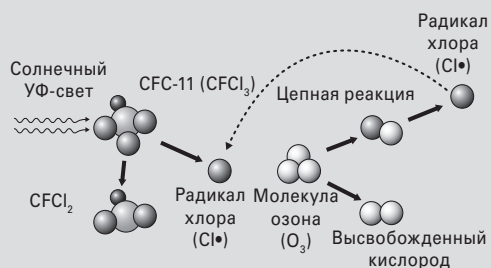
Разработаны хладагенты ХФУ

**1939**

Первый холодильник-морозильник в США

## Как ХФУ разрушили озоновый слой?

На солнечном свете фторуглероды разлагаются и высвобождают радикалы хлора, а эти свободные атомы благодаря неспаренному электрону и «болтающейся» связи чрезвычайно активны. Радикалы хлора запускают цепную реакцию, в которой атом кислорода отрывается от молекулы озона ( $O_3$ ). Затем эти радикалы образуют недолговечные соединения с кислородом, но следом распадаются и порождают новые радикалы хлора, а те в свою очередь разрушают следующие молекулы озона. Подобные же реакции происходят и с участием брома. Во время антарктической зимы солнца мало или нет вообще, и реакции эти идут лишь весной-летом, когда появляется солнце. Остаток года хлор из ХФУ



заперт в неактивном виде в ледяных облаках. Озон разрушается и сам по себе, под воздействием солнечных лучей, но обычно с той же скоростью образуется вновь. В присутствии же радикалов хлора равновесие этой реакции смещается в сторону распада озона.

производители холодильников применяли метилхлорид, аммиак и диоксид серы (сернистый газ), а это всё опасные для вдыхания в замкнутом пространстве газы. Протечка хладагента могла оказаться смертельной.

### И НИКАКОЙ ЗАПАРКИ

Многие считают, что к разработке неядовитых хладагентов химию подтолкнул смертоносный взрыв метилхлорида в кливлендской больнице в 1929 году. На самом-то деле около 120 человек погибло, надышавшись угарного газа, а также оксидов азота, образовавшихся от возгорания рентгеновской пленки, а не от самого метилхлорида. Но в любом случае химическая промышленность уже отчетливо понимала, что несчастные случаи, вызванные ядовитыми газами-хладагентами, требуют найти какое-то другое решение.

**1974**

Открытие механизма истончения озонового слоя

**1985**

В озоновом слое над Антарктидой обнаружена дыра

**1987**

Подписано Монреальское соглашение о сокращении производства веществ, разрушающих озоновый слой

За год до кливлендского инцидента Томас Миджли-мл., ученый из «Дженерал Моторз», синтезировал неядовитое галогенсодержащее вещество дихлордифторметан ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ), но это неловкое название сократили до «фреона». То был первый ХФУ, хотя вплоть до 1930 года о нем официально не заявляли. Начальник Миджли Чарлз Кеттеринг искал новый хладагент, который «не будет воспламеняться и вредить людям». Задним числом можно было бы счесть это дурным знаком: Миджли, только что разработавшего антидетонационную присадку тетраэтилсвинец, приставили к задаче поиска безвредного хладагента.

В 1947 году, через три года после смерти — или возможного самоубийства — Миджли, Кеттеринг написал, что у фреона есть как раз нужные свойства. Он не воспламенялся и вообще «не имел никаких вредоносных

**ЖИТЬ НА 6 ДОЛЛАРОВ  
В ДЕНЬ ОЗНАЧАЕТ, ЧТО  
У ВАС ЕСТЬ ХОЛОДИЛЬНИК,  
ТЕЛЕВИЗОР, МОБИЛЬНЫЙ  
ТЕЛЕФОН, А ВАШИ ДЕТИ  
ХОДЯТ В ШКОЛУ**

Уильям «Билл» Генри Гейтс  
(р. 1955), американский  
предприниматель, основатель  
компании «Майкрософт»

воздействий на человека и животных». Что правда, то правда, но лишь в одном смысле: вредоносного воздействия на людей и животных он не оказывал при непосредственном контакте. Кеттеринг отметил, что ни одно лабораторное животное, на котором тестировали вещество, никаких признаков отравления при вдыхании этого газа не выказало. Миджли даже доказывал безопасность вещества, вдыхая его лично и прилюдно, на презентации нового хладагента. Так вот и вышло, что ХФУ стали закачивать в холодильники. Миджли, безвременно скончавшись, не дожил до полного осознания последствий своего открытия.

## ЗАТКНУТЬ ДЫРУ

В 1974 году, примерно в ту пору, когда холодильники набивали шварцвальдскими тортами и арктическими рулетами, в статье Шерри Роуланда и Марио Молины, химиков из университета Калифорнии, возникло первое подтверждение воздействия ХФУ на атмосферу. В статье говорилось, что озоновый слой, защищающий нас от большей части УФ-излучения Солнца, может истощиться вдвое уже к середине XXI века, если ХФУ немедленно не запретить.

Неудивительно, что химические компании, наживающиеся на хладагентах, встретили эту весть нелюбезно. К тому времени доказательств того, что ХФУ действительно нанесли урон озоновому слою, не существовало — Роулэнд и Молина лишь описали механизм реакции. Многие

относились к этому представлению скептически и утверждали, что запрет ХФУ нанесет чудовищный экономический ущерб.

Прошло еще десять лет, и появилось наконец бесспорное доказательство существования озоновой дыры. С конца 1950-х в рамках программы «Британское антарктическое исследование» проходил мониторинг озона в атмосфере над Антарктидой, и к 1985 году ученые уже накопили достаточно данных, чтобы постановить: концентрация озона падает. Сведения со спутников показали, что дыра покрывает собой всю Антарктиду целиком. Всего через пару лет страны всего света ратифицировали Монреальский протокол по веществам, истощающим озоновый слой, и этот протокол зафиксировал график исключения ХФУ из производства.

Так что же там булькает на задах у вашего холодильника? Кто-то из производителей заменил ХФУ на ГФУ (гидрофторуглероды). Поскольку ущерб наносят радикалы хлора и брома, ГФУ — типовой заменитель запрещенных ХФУ. Однако в 2012 году Марио Молина выступил соавтором статьи о новой напасти: ГФУ озоновый слой, может, и не разрушают, но некоторые могут создавать парниковый эффект в тысячи раз мощнее, чем диоксид углерода. В июле 2014 года участники Монреальского протокола взялись обсуждать эту беду — пятый год подряд.

## А теперь как?

С конца 1970-х до начала 1990-х дыра в озоновом слое резко разрослась. Со времен Монреальского протокола ее границы стабилизировались и начали наконец потихоньку сжиматься. Дыра достигла максимума площади в сентябре 2006 года и составила 27 миллионов квадратных километров. Поскольку вещества, истощающие озоновый слой, живут в атмосфере долго, согласно прогнозам ученых НАСА, сжатие озоновой дыры до размеров 1980-х случится лишь к 2065 году.

## В сухом остатке: Поучительная история о веществах



# 42

## Композиты

Зачем применять один материал, когда два лучше? Сочетание различных материалов позволяет получать гибриды с необычными свойствами — выдерживающие температуры до тысяч градусов или неуязвимые для пуль. Передовые композитные материалы защищают космонавтов, солдат, полицейских — и даже ваш хрупкий смартфон.

**7** октября 1968 года первый пилотируемый космический корабль «Аполлон» стартовал с авиабазы на мысе Кеннеди (Флорида) и отправился в напряженный 11-дневный полет, в котором предстояло проверить контакт между экипажем и центром управления полетом. Годом ранее три члена экипажа погибли при запуске другого пилотируемого аппарата «Аполлон». Оставшимся членам экипажа тем не менее все удалось — люди не только впервые высадились на Луне, но и успешно вернулись на Землю.

Одной из важных особенностей командного отсека «Аполлона» была его тепловая защита. «Аполлон-13» пострадал от взрыва, экипажу пришлось дотягивать до дома с минимальными ресурсами, и от тепловой защиты зависела их судьба. Если бы материал подвел, Джим Ловелл, Джек Суигерт и Фред Хейз изжарились бы.

### В МАТРИЦЕ

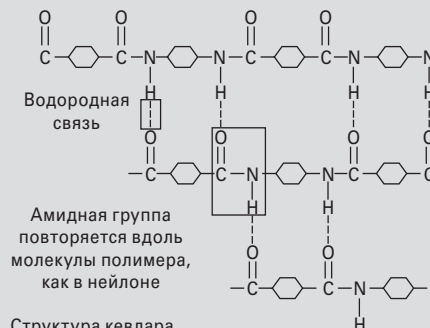
Тепловая защита «Аполлона» была сделана из композитных материалов с абляционными свойствами: они горят медленно и не допускают повреждения космического судна. Был применен композит под названием «авкоут», и, хотя после миссии «Аполлон» его не применяли, НАСА решило использовать его как защитное покрытие «Ориона» — следующего пилотируемого корабля, отправляемого на Луну.

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1879	1958	1964	1968
Томас Эдисон спекает хлопковую вату и получает углеродные волокна	Роджер Бейкон демонстрирует первые высокоэффективные углеродные волокна	Стефани Кволек впервые получает волокна арамида	Тепловая защита командного отсека «Аполлона» состоит из композитных материалов

## Кевлар®

Существует множество разновидностей и типов кевларовых волокон, одни прочнее других. В основном нам доводится слышать про те, которые используют правоохранительные органы, — это легкие пуленепробиваемые материалы, но такие же волокна применяют и в корпусах морских судов, ветряных двигателей, а иногда и в смартфонах. Химически дело обстоит так: полимерные цепочки в кевларе напоминают нейлоновые, в обеих есть повторяющаяся амидная группа (выделена на рисунке). Стефани Кволек из компании «Дюпон» создала кевлар, возясь с нейлоном. Но у нейлона цепочки скручены и не могут образовывать устойчивых слоев. Каждая амидная группа в кевларовом полимере способна образовывать сильные водородные связи с двумя соседними цепочками. Повторяясь



Структура кевлара

вдоль всей длины каждой цепочки, такие связи создают упорядоченную и очень крепкую сетку. Есть, впрочем, один минус: эта структура придает материалу минимальную гибкость, и потому такой бронежилет спасет вам жизнь, однако носить его неудобно.

Как и прочие композиты, авкоут наделен особыми свойствами: он стоек к температурам в тысячи градусов, и все благодаря сочетанию нескольких материалов, что делает результирующий сверхматериал лучше, чем простая сумма достоинств компонентов.

Многие композиты имеют две составляющие. Одна — матрица, зачастую это смола, которая действует как связующее для другого компонента. Второе вещество — как правило, волокно или частицы, укрепляющие матрицу, они придают ей крепость и структурированность. Авкоут сделан из кремнесодержащих волокон, введенных в смолу, которой придают форму стекловолоконной ткани с ячеистой структурой. Командные отсеки «Аполлона» защищало покрытие более чем с 300 000 отверстий-ячеек, которые заполняли вручную.

1969

Самолет F-4  
оборудован рулями  
из композита  
«бор — эпоксид»

1971

Компания «Дюпон»  
выводит на рынок  
арамидные волокна кевлар

2015

Корабль «Орион» готовится  
к отправке на Луну,  
теплозащита — авкоут

## ОБЫКНОВЕННЫЕ КОМПОЗИТЫ

Может показаться, что никаких других материалов вроде авкоута мы и не знаем. Но композиты применяются далеко не только в космосе, они лишь на первый взгляд экзотика. Бетон — прекрасный пример композитного материала. Это смесь песка, гравия и цемента. Есть и природные композиты — кости, например. Они состоят из минерала гидроксиапатита и белка коллагена. Ученые-материаловеды пытаются воспроизвести структуру кости лабораторно и создать материалы, структурированные на наноуровне, с возможным применением в медицине.

Вероятно, самые известные композиты — углеродное волокно и кевлар. Углеродным волокном называются жесткие углеродные нити, придаю-

**Я ПОДУМАЛА, ЕСТЬ  
В ЭТОМ ЧТО-ТО НОВОЕ.  
МОЖЕТ ПРИГОДИТЬСЯ**

Стефани Кволек (1923–2014),  
американский химик —  
об изобретении кевлара

щие прочность клюшкам для гольфа, кузовам автомобилей «Формулы-1» и протезам. Этот материал был открыт в 1950-х годах Роджером Бейконом и стал частью первого высокоэффективного композита. (Бетон нашел широкое применение на сто лет раньше.) Бейкон назвал углеродные нити «усиками» и показал, что они в 10–20 раз крепче стали. Обычно, говоря «углеродное волокно», мы подразумеваем полимер, укрепленный углеродным во-

локном, — композитный материал, который образуется, когда «усики» интегрируют в смолу вроде эпоксидной — или в какое-нибудь другое связующее вещество.

Через несколько лет химик Стефани Кволек из американской компании «Дюпон» открыла арамиды, «Дюпон» запатентовал это изобретение, а сам материал поступил на рынок под названием «кевлар» в 1970-х. Кволек открыла этот пуленепробиваемый материал, разрабатывая материалы для покрышек: она обнаружила, что у нее получается волокно крепче нейлона, оно не рвется при сучении. Крепость кевлара обусловлена его высокоупорядоченным химическим устройством, что, в свою очередь, позволяет образовываться регулярным водородным связям (см. с. 20) между полимерными цепочками.

## ПОЛЕТЕЛИ

Высокоэффективные композиты типа углеродного волокна применяются не только в космосе. Современный самолет — это конструктор из композитов. Основная часть корпуса самолета «Боинг-787 Дримлайнер» на 50% состоит из новейших композитных материалов, в основном — из

пластмассы, укрепленной углеродным волокном.

Экономия веса дает преимущество и на земле, и в 2013 году инженеры из линчбергской компании «Эдисон 2» (Вирджиния, США) явили миру четвертую версию своего СЛА — сверхлегкого автомобиля. «СЛА 4.0» весит всего 635 килограммов, а это меньше, чем автомобиль «Формулы-1», и примерно в половину меньше массы обычного семейного авто, хотя смотрится «СЛА 4.0» как крошечный белый самолетик. Как и «Дримлайнер», он сделан из стали, алюминия и углеродного волокна.

### Самоисцеляющиеся материалы

Вообразите крыло самолета, которое само затянет на себе трещину. Одно из активно обсуждаемых свойств композитных материалов — их способность к самовосстановлению. Исследователи из университета Иллинойса (Урбана-Шампейн, США) работают над созданием усиленных волокном материалов, содержащих каналы, заполненные восстанавливающими веществами. Если материал поврежден, из каналов вытекают смола и отвердитель, и они вместе затягивают образовавшуюся брешь. В 2014 году ученые доложили, что разработали систему, способную самовосстанавливаться таким образом — и не единожды.

За десять лет разработок корабль «Орион» почти готов к первым непилотируемым тестовым полетам. Безопасность дальнейших пилотируемых полетов, как и у предыдущего «Аполлона», будет зависеть от авкоутовой теплозащиты командного отсека. Тепловая защита «Ориона» — пять метров в диаметре, ничего крупнее прежде не производили. Процесс производства придется «восстанавливать»: кое-какие из исходных ингредиентов теперь уже и не добыть. И все же авкоут по-прежнему считается лучшим для этих целей материалом — даже 50 лет спустя.

**В сухом остатке:**

**Материалы, которые лучше  
суммы своих составляющих**

# 43

## Солнечные батареи

Большинство современных солнечных батарей сделаны на основе кремния, но ученые ищут другие решения. Хочется чего-нибудь подешевле, ну и попрозрачнее — может, на основе композитных материалов. А еще лучше было бы придумать какой-нибудь напылитель — чтобы можно было набрызгать на любую стеклянную поверхность, и никаких вам батарей центрального отопления!

**Н**аступило Будущее. Вы покупаете новый дом, и вам предстоит принять множество трудных решений. Какую плитку взять в ванную? Стандартные смесители или затейливые? Какого цвета ковры? Есть о чем подумать и про окна: двойное остекление — точно, однако брать ли солнечные? Агент застройщика говорит, что, если выберете солнечные, придут субподрядчики поставщиков окон и напылят совершенно прозрачное, поглощающее солнечный свет вещество на выбранные вами оконные стекла. Ваши солнечные окна будут снабжать вас электричеством, и его даже можно будет сдавать в государственную электросеть и покрывать до половины стоимости отопления. И отличаться они от обычных окон не будут.

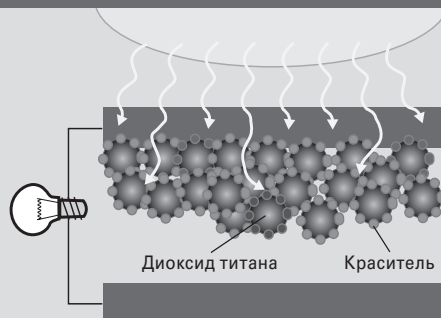
Но это мечта, конечно. Вернемся в настоящее. Здесь нам по-прежнему приходится решать непростые вопросы эффективности — как добывать максимум энергии из солнечного света, а также стоимости производства материалов для этой добычи. И все же не слишком это невообразимо — напыление на окна и другие домашние поверхности веществ, впитывающих солнечный свет. Основная часть разработок уже сделана — по крайней мере, лабораторно.

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1839	1839	1954	1958
Эдмон Беккерель [Беккерель] наблюдает фотоэлектрический эффект	Эдмон Беккерель обнаруживает <i>p-n</i> -барьер в полупроводниках	Ученые из лабораторий «Белл» разрабатывают солнечную батарею на основе кремния	Запущен первый спутник («Эксплорер VI») с четырьмя лопастями солнечных батарей

## Солнечные батареи на основе красителей

В фотосинтезе энергию солнечного света усваивает хлорофилл, природный пигмент, который передает возбуждение, провоцируемое светом, электронам посредством цепи химических реакций и тем создает химическую энергию (см. с. 148). Сенсибилизированные красителем солнечные батареи, изобретенные швейцарским химиком Михаэлем Гретцелем в 1991 году, способны на нечто подобное благодаря нанесенному на них пигментному веществу. Сенсибилизация красителем означает, что краситель делает батарею чувствительной к свету. Этот краситель нанесен на полупроводник внутри батареи, они химически связаны друг с другом, и когда на ячейку батареи попадает свет, он возбуждает электроны в красителе, те «перепрыгивают» в полупроводниковый слой, который превращает их в электрический ток. Ученые проверили действие сенсибилизаторов порфиринов, аналогичных растительному пигменту хлорофиллу. Наиболее фоточувствительными



признаны красители, содержащие переходные металлы — рутений, например, хотя рутений — редкий металл, и потому его на производство солнечных батарей в дальней перспективе не хватит. Эффективность в целом тоже пока низкая. В 2013 году, впрочем, Гретцель и его коллеги в Швейцарском федеральном технологическом институте применили перовскитоподобные материалы и так увеличили эффективность извлечения энергии сенсибилизированными солнечными батареями до 15%.

## НАЧНЕМ С КРЕМНИЯ

В наши дни большинство солнечных батарей, которые вы замечаете на зданиях или на фотоэлектростанциях, сделаны из кремния, что неудивительно: кремний повсюду в компьютерных чипах, и мы уже много чего знаем о химии и электронных свойствах этого материала. Первая кремниевая батарея была создана в лабораториях «Белл» — компании, которая разработала транзисторы и метод нанесения схем на кремний, что впоследствии оказалось чрезвычайно важным для производства кремниевых чипов. Об этой солнечной батарее с эффективностью 6% объявили в 1954 году и вскоре ее уже приспособили запитывать энергией орбитальные спутники.

**1960**

«Силикон Сенсорз» начинают производить солнечные батареи на основе кремния

**1982**

Первые мегаваттные солнечные электростанции

**1991**

Михаэль Гретцель и Брайен О'Риган сообщают о первых солнечных батареях на основе красителей

**2009**

Первые сведения о применении перовскитоподобных структур в солнечных батареях

Исследование фотоэлектрического эффекта, впервые открытого в 1839 году французским физиком Александром Эдмоном Беккерелем, глубоко связано с историей лабораторий «Белл» и с химиком Расселом Олем. В 1939 году Оль занимался поиском материалов, способных улавливать коротковолновые радиосигналы. Разбираясь с показателями по кремнию, он включил вентилятор, который располагался между окном и кремниевыми цилиндрами. Оль удивился, заметив, что пики замераемого им напряжения совпадали с вращением лопастей вентилятора, пропускавшими свет. Недолго почесав в затылке, Оль и его коллеги поняли, что кремний проводит электричество на свету.

Ныне передовые кремниевые фотоэлектрические приборы рвутся к отметке 20%-ной эффективности; они все еще довольно дороги, и на окно такую штуку не пристроишь. И все же мечта об эффективной «встроенной фотовольтаике» становится все ближе к действительности — со времен изобретения органических солнечных батарей, которые, подобно растениям, улавливают энергию солнечного света благодаря органическим молекулам в них. Такие солнечные батареи можно делать из гибких пленок боль-

шой площади, их можно скатывать в рулон, гнуть или покрывать ими искривленные поверхности. С ними пока одна неувязка: по эффективности они до неорганических кремниевых батарей не дотягивают.

### Перовскитоподобные

Перовскит — природный минерал  $\text{CaTiO}_3$  (титанат кальция), обладающий специфической кристаллической структурой. Вещества, которые кристаллизуются подобным образом, называют перовскитоподобными. Эти вещества могут представлять собой гибриды органических и неорганических веществ, содержащие галогены (бром или йод) и металлы. Одна такая структура оказалась применительно к солнечным батареям успешнее прочих, ее химическая формула  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  (как видно из формулы, в ней содержится и свинец). Свинец — узкое место с практической точки зрения: он ядовит, и экологические нормы на продукты с его содержанием суровы уже не первое десятилетие. Зато исследователи недавно доказали, что могут перерабатывать свинец из старых аккумуляторов и включать его в состав солнечных батарей.

### ПЕРЕХОДИМ НА ОРГАНИКУ

Устройство органической солнечной батареи подобно сэндвичу: вместо ломтей хлеба в ней электродные слои, а между ними — слои органического материала, активируемого солнечным светом. УФ-свет возбуждает электроны в этом материале, они поступают в электродные слои и генерируют электрический ток. Усовершенствование материалов внутренних или внешних слоев этого сэндвича — путь к более эффективным солнечным батареям. Графен, к примеру, опробовали как

замену применяемым ныне электродам из оксида индия-олова, и графеновые электроды вполне годятся, судя по статье, опубликованной в 2010-м. И тот и другой электроды прозрачны, но графен предпочтительнее, потому что оксид индия-олова — не очень доступный материал.

**Я БЫ ПОСТАВИЛ ДЕНЬГИ НА СОЛНЦЕ И СОЛНЕЧНУЮ ЭНЕРГИЮ, ТАКАЯ В НИХ МОЩЬ! НАДЕЮСЬ, МЫ РЕШИМ ЭТУ ЗАДАЧКУ ПРЕЖДЕ, ЧЕМ У НАС КОНЧАТСЯ НЕФТЬ И УГОЛЬ**

Томас Эдисон (1846–1931),  
американский изобретатель, предприниматель

Химическая компания BASF недавно объединила усилия с «Даймлером» — подразделением «Ягуара», — и они теперь вместе делают органические, прозрачные, светособирающие солнечные панели на крыши своих новых электромобилей — «смарт-форвижн». К сожалению, крыша не впитывает энергии достаточно, чтобы хватило на движение, но хоть на кондиционер внутри набирается. Именно низкая эффективность солнечных батарей — их главная теперешняя беда. Они все никак не переберутся за отметку в 12%. К тому же кремниевые солнечные панели служат до 25 лет, а органическому аналогу непросто выжить и половину этого срока. Зато их можно красить в любой цвет, и они гнутся. Так что если вам понадобится гнущийся прибор на солнечной батарее пурпурного цвета, который придется через пару лет выкинуть, органические батареи — ваш выбор.

## СОЛНЕЧНОЕ НАПЫЛЕНИЕ

Пока идет работа с органическими материалами, нацеленная на повышение их эффективности и долговечности, возникают новые материалы. Перовскитоподобные структуры, содержащие и органические, и неорганические составляющие, вошли, по мнению всемирно прославленного журнала «Сайенс», в десятку научных прорывов 2013 года. Эти материалы демонстрируют удивительную эффективность — 16%, и это совсем не предел — есть прогнозы 50%-ной эффективности. Их легко производить, да и методы напыления уже разрабатываются. Быть может, до окошка из Будущего недалеко. Хотя, конечно, покрывать половину вашего счета за отопление — не фунт изюма.

**В сухом остатке:**

**Материалы вырабатывают электричество из солнечного света**



# 44 **Лекарства**

**Как химики разбираются с лекарствами? Откуда берется идея и как она превращается в действующий препарат? Многие продукты фармацевтической промышленности основаны на природных соединениях, есть и немало «хитов», созданных подбором полезных веществ среди тысяч, а то и миллионов известных.**

**П**репаратов существует громадное множество. Есть такие, которые доктор прописал. А есть и такие, которыми торгуют в трущобах темные личности. Есть такие, от которых и помереть недолго. И те, что спасают жизнь. И стимуляторы. И успокоители. Есть препараты из грибов, ядовитых улиток, мака и ивовой коры. Есть совершенно синтетические, придуманные и изготовленные химиками. А еще есть уникальные, основанные на веществах, найденных в морских губках, и они существуют в миллионе разных химических форм, требуют 62 отдельных стадий лабораторного изготовления и применяются для лечения запущенного рака груди.

## **МОРЕ-ОКЕАН**

В начале 1980-х японские исследователи из университетов Мэйтэ и Сидзуока собирали образцы губок на полуострове Миура к югу от Токио. Губки — морские животные, их колонии насчитывают сотни тысяч особей, и похожи они скорее на растения или грибы. Одно конкретное животное — черная губка, которой ученые набрали 600 килограммов, производит вещество, вызвавшее научный интерес. В 1986 году исследователи объявили в одном химическом журнале, что это вещество «показывает замечательные... антиопухолевые свойства».

## **СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1806**

Из опийного мака выделяют морфин

**1928**

Открытие пенициллина

**1942**

Химическое оружие — горчичный газ (иприт) — применяется для первой химиотерапии рака

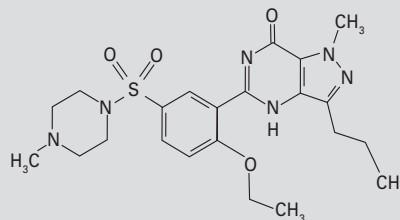
**1963**

Запуск производства бензодиазепина (валиума)

## Виагра

Силденафил, более известный как виагра, — ингибитор фосфодиэстеразы 5-го типа, что означает, что он мешает ферменту фосфодиэстеразе 5-го типа (ФДЭ5) выполнять свою работу. К 1980 году ученые из компании «Файзер» уже знали, что ФДЭ5 вызывает расщепление вещества, отвечающего за расслабление мышц кровеносных сосудов. Действие виагры основано на том, что она мешает ФДЭ5 расщеплять это вещество, и кровь устремляется в расслабленные кровеносные сосуды. Команда «Файзера» нацеливалась на разработку лекарства для пациентов-сердечников. В 1992 году начались тесты силденафила на пациентах с сердечными недугами. Быстро

Молекула виагры



стало ясно: во-первых, лекарство ни стенокардию, ни повышенное кровяное давление толком не облегчает, во-вторых, вызывает необычные побочные эффекты у пациентов-мужчин.

В прошлом возможностей воспользоваться силой такого вещества было совсем немного — только собирать в море губки. Что поначалу и делали. Позднее выяснилось, что и другая, более распространенная, но глубоко-водная губка производит то же вещество от рака, и Национальный институт рака (НИР) в США и новозеландский Институт водных и атмосферных исследований выдали полмиллиона долларов на поднятие тонны этих животных со дна морского у берегов Новой Зеландии. На выходе получилось менее полуграмма искомого вещества — галихондрина В.

Хуже того вот что: галихондрин В практически невозможно было воспроизвести синтетически. Это громадная, сложная молекула с миллиардами разновидностей — стереоизомеров (см. с. 137), где друг с другом соединены одни и те же атомы, но некоторые группы внутри молекулы сориентированы в пространстве по-разному.

**1972**

Открытие флуоксетина (прозака)

**1987**

Выписан по рецепту первый статин — ловастатин

**1998**

Запущена продажа виагры

**2006**

Продажи «файзеровского» лекарства липитора, понижающего концентрацию холестерина в крови, достигают 13,7 млрд долларов

## Легкая мишень?

Большинство популярных препаратов — вещества, взаимодействующие с рецепторами на поверхности клетки, пример — рецепторы, сопряженные с G-белком (серпентины). Они размещены на мембране и передают химические сообщения. Более трети всех прописываемых лекарств, в том числе и зантак (от несварения желудка), и зайпрекса (от шизофрении), действуют именно на эти рецепторы. Именно поэтому разработчики лекарств продолжают перебирать тысячи потенциальных лекарств — ищут, какие еще из них могут действовать на эти сенсоры клетки.

## В БИБЛИОТЕКЕ

К 1990-м химики нащупали новую стратегию создания лекарств: не полагаться на биосинтез (см. с. 144) или долгий химический синтез (см. с. 64) той или иной молекулы, а собрать «библиотеки» разнообразных веществ и перебирать их в поисках интересных свойств и действий. Этот метод может быть полезен, если нужно, допустим, вещество, чья молекула ориентирована на специфический рецептор клетки. Применяя химическую библиотеку, можно проделать один и тот же тест на множестве различных веществ и получить список тех, которые взаимодействуют с нужным рецептором. Получается короткий список, который дальше имеет смысл изучать пристальнее.

Меж тем химический способ получения галихондрина В наконец обнародовали, но метод оказался трудоемким, да и выход вещества все равно низкий. Японская фармацевтическая компания «Эисаи» принялась синтезировать вещества, подобные галихондрину В, но попроще, чтобы

проверить, не сработает ли какое. Ученые видели в них аналоги, то есть ожидали, что механизм их воздействия будет таким же, хоть устройства молекул и различаются. Ученые из «Эисаи» знали из отчета НИР, что исходное вещество воздействовало на тубулин — белок, который удерживает структурное единство клетки, он нужен раковой опухоли для роста. Любый эффективный аналог должен был воздействовать на то же вещество.

Пусть подход японских исследователей и был немного дедовским, он сработал. Они нашли эрибулин — продукт, который ныне разрешен как лекарство на поздних стадиях рака груди, хотя у него миллион возможных стереоизомеров и получают его в 62 стадии. Искать вдохновения в природе — по-прежнему действенный метод фармацевтов, потому что природа большую часть работы уже произвела. Примерно 64% всех новых лекарств, выпущенных на рынок между 1981 и 2010 годами, так или иначе вдохновлены природой. Большинство либо выделено из живых организмов, либо повторено по образцам веществ, производимых живыми организмами, либо это модификации подобных веществ — или же препарат задуман для

взаимодействия со специфическими молекулами в живых организмах. Иногда требуется лишь немного (или много) умной химии, и вдохновение воплотится на деле.

## ДИЗАЙНЕРСКИЕ ЛЕКАРСТВА

И все же есть навалом лекарств иного происхождения. Виагра, например (см. с. 177), — неудачный препарат от сердечных заболеваний, ставший самым взрывным бестселлером среди лекарств за всю историю человечества. Но если нужно с чего-то начать поиск, очевиднее всего браться за природные вещества, отвечающие за болезнь, будь то частицы, производимые вирусами, или поломанные молекулы в теле самого хворающего. Если от препарата требуется специфическое воздействие, пригодится подход, именуемый «рациональным дизайном». С помощью, например, рентгеноструктурного анализа (см. с. 88) можно добыть достаточно сведений о веществе, вызывающем заболевание, и создать препарат, частицы которого смогут воздействовать на вредоносные молекулы — допустим, не давать им наносить ущерб организму. Первые этапы этой работы можно проводить компьютерным моделированием, а затем уж синтезировать вещество-кандидат в лаборатории.

Рациональный дизайн — одна из стратегий, которые химики применяют к едва ли не величайшей проблеме, стоящей перед фармацевтами в наши дни: устойчивость к лекарствам. Микробы и вирусы приспосабливаются с устрашающей скоростью и уходят от химического удара, и потому единственная на них управа — применение новых видов оружия, новых классов лекарств. Тем временем химии предстоит найти вещества, молекулы которых доставят новые лекарства в конкретные точки организма, и это одно из многих дел новой области знания — нанотехнологии.

**НАДЕЕМСЯ, ЧТО ПРЕДПРИИМЧИВЫЕ И ПРИЛЕЖНЫЕ ХИМИКИ-ОРГАНИКИ НЕ ПРОМОРГАЮТ УНИКАЛЬНУЮ ФОРУ, КОТОРУЮ ПРИРОДА ДАЕТ НАМ В ЗАБЕГЕ К НОВЫМ ДЕЙСТВУЮЩИМ ВЕЩЕСТВАМ И НОВЫМ МЕТОДАМ В МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Ребекка Уилсон и Сэмюэл Данишефски,  
в «Отчетах о химических исследованиях»

## В сухом остатке:

**Природные и синтетические пути  
к веществам, побеждающим хвори**

Всего несколько десятилетий назад один из величайших ученых XX века выдвинул кое-какие чокнутые идеи — про манипуляции отдельными молекулами и малюсенькие приборчики. Задним числом они и вполнину не такие чокнутые — вполне точные предсказания того, чем нынче богаты нанотехнологии.

**Ф**изик Ричард Фейнман [Фейнмен], один из ученых, участвовавших в разработке атомной бомбы и исследовании крушения космического челнока «Чэлленджер», прочитал знаменитую лекцию о «проблемах манипуляции и контроля в малых масштабах». Лекция состоялась в 1959 году, и в те времена обсуждаемое в ней казалось совершенно маловероятным, едва ли не фантастическим. Фейнман не употребил слово «нанотехнологии» — его предложил один японский инженер лишь в 1974 году, — но речь шла о перемещении отдельных атомов, постройке наномашинок — механических хирургов — и размещении целой энциклопедии на булавочной головке.

Через несколько десятилетий после Фейнманова полета фантазии какая часть сказанного стала былью? Можем ли мы, к примеру, манипулировать отдельными атомами? Еще как. В 1981 году был изобретен сканирующий туннельный микроскоп, он дал ученым первую возможность взглянуть на мир атомов и молекул. Позднее, в 1989 году, Дон Эйглер из IBM понял, что может с помощью зонда этого микроскопа гонять атомы туда-сюда, и выложил аббревиатуру IBM из 35 атомов ксенона. К тому времени ученые в этой новой области науки располагали еще одним мощным прибором — атомным силовым микроскопом, и Эрик Дрекслер уже написал свою

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1875**

Открытие коллоидного «рубинового» (наноструктурного) золота

**1959**

Ричард Фейнман читает лекцию «Там, внизу, полно места!»

**1986**

Изобретение атомного силового микроскопа

неоднозначную книгу о нанотехнологиях — «Машины творения». Нанотехнологии стояли на пороге.

## ПЕРЕИМЕНУЕМ МЕЛЮЗГУ

Ныне тысячи продуктов — от пудр для лица до телефонов — уже содержат материалы наномасштабов. Возможности потенциального применения есть в любой отрасли промышленности: и в здравоохранении, и в производстве возобновляемой энергии, и в строительстве. Но наноштуки — не человеческое изобретение. Всякие чудеса наноразмеров существовали в природе задолго до нашего появления.

Наночастицы полностью соответствуют своему названию: они крошечные, обыкновенно размером от 1 до 100 нанометров, или 1–100 миллионных миллиметра. Это размеры атомов и молекул — химикам в таких масштабах, наверное, привычно, поскольку основную часть своего времени они думают об атомах и молекулах и их поведении в химических реакциях. В большинстве веществ атомы сбиваются в кучи и образуют «плотные» материалы, но атом золота в золотом слитке имеет совсем другие свойства, нежели золотая наночастица, в которой лишь несколько атомов этого металла. В лаборатории можно сделать из куска золота множество наночастиц, но и в природе уйма веществ существует в нановиде.

Открытие углеродных бакминстерфуллеренов (см. с. 112) — шаров диаметром 1 нанометр, состоящих из 60 углеродных атомов, часто считают вехой в истории нанотехнологий, но они полностью природного происхождения. Конечно, их можно создать и лабораторно, однако они формируются сами собой в копоти свечи. Ученые, сами того не ведая, творили наночастицы уже много веков. В XIX веке химик Майкл Фарадей производил эксперименты с коллоидным золотом, применявшимися при изготовлении витражей, и сам при этом не знал, что золотые частицы в коллоиде — наноразмеров. Это стало известно лишь в 1980-х, в век нанотехнологий.

**Я НЕ БОЮСЬ СТАВИТЬ ВОПРОС РЕБРОМ: СМОЖЕМ ЛИ МЫ КОГДА-НИБУДЬ РАСПОЛАГАТЬ АТОМЫ ПО СВОЕМУ УСМОТРЕНИЮ — САМИ АТОМЫ, МЕЛЬЧЕ НЕКУДА!**

Ричард Фейнман (1918–1988),  
американский физик, из лекции 1959 года

**1986**

Эрик Дрекслер публикует «Машины творения: грядущая эпоха нанотехнологий»

**1989**

Дон Эйглер выкладывает из отдельных атомов ксенона аббревиатуру IBM

**1991**

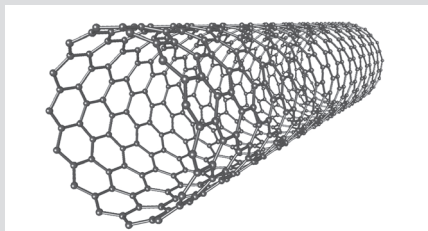
Открытие углеродных нанотрубок

**2012**

Заявлены транзисторы, сделанные из одного атома фосфора

## Электроника на нанотрубках

Нанотрубки — малюсенькие трубочки из углерода, невероятно крепкие и проводящие электричество. Они могут заменить кремний в электронике, и из них уже делают транзисторы в микросхемах. В 2013 году исследователи из Стэнфордского университета построили простенький компьютер с процессором, сделанным из 178 нанотрубочных транзисторов. У него получалось отрабатывать всего две программы одновременно, а вычислительная мощность была такая же, как у самого первого «интеловского» микропроцессора. Трудность с применением нанотрубок в транзисторах состоит в том, что они не идеальные полупроводники — у некоторых нанотрубок «подтекает» электричество. Одна американская группа ученых обнаружила, что введение наночастиц оксида меди улучшает полупроводниковые свойства нанотрубок.



## РАЗМЕР ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ

И все же считать, что в нанотехнологиях нет ничего нового и увлекательного, не получится. Не получится и делать вид, что новые материалы — те же самые, «просто мельче», поскольку дело не только в этом. В наномасштабах все действует не так, как в толще того же материала. Из самого очевидного: материалы, состоящие из наночастиц, имеют гораздо большую площадь на единицу объема, а это особенно важно для всяких химических процедур с их участием. Еще чуднее, что такие вещества и материалы ведут себя иначе. Цвет золотых наночастиц, к примеру, зависит от их размера. Коллоидное золото Фарадея золотистым по цвету не было. Оно было рубиново-красным.

Такая диковинность может приносить пользу: коллоидное золото с древности применяли в витражных стеклах. Однако есть и загвоздки: серебряные наночастицы все активнее применяют в антимикробных напылениях, толком не ведая, как эти крошечные частицы поведут себя в окружающей среде, куда они попадают с водой, какое влияние они окажут, когда их накопится заметное количество.

## ЦАРСТВО ФАНТАЗИИ

Меж тем ученые продолжают работать «снизу» (см. с. 100) — создавать предметы и приборы наноразмеров. Это пространство бескрайних возможностей — создание и наночастиц, и наномашинок. Могут ли малюсенькие приборчики совершить переворот в медицине, как воображал Фейнман? «Интересная получилась бы хирургия, если б можно было проглотить хирурга, — говорил он в лекции 1959 года. — Помещаете

механического хирурга в кровеносный сосуд, он отправляется в сердце и оценивает там обстановку». Фейнманов нанохирург, может, еще и не воплощен в действительности, но списать его нацело на праздные фантазии мы тоже не можем. Исследователи уже трудятся над разработкой наноприборов, которые смогут доставлять лекарства прямо к пораженным клеткам и никак не затрагивать здоровые.

Но нет нужды углубляться в научную фантастику — и в реальном мире достаточно применений нанотехнологиям. «Самсунг» уже использует наноматериалы в электронных дисплеях телефонов. Нанотехнологии располагают методами создания лучших катализаторов дожигания топлива и уменьшения выхлопа. Кремы от загара содержат наночастицы диоксида титана давным-давно, вопреки некоторым сомнениям в его безопасности.

Так что же, можно ль записать целую энциклопедию на булавочной головке? Запросто. В 1986 году Томас Ньюмен из Калифорнийского технологического института перенес страницу из «Повести о двух городах» Чарлза Диккенса на кусочек пластмассы площадью шесть тысячных миллиметра, а значит, разместить «Британскую энциклопедию» на двухмиллиметровой булавочной головке вполне можно.

## ДНК-доставка

Строительные приборы наномасштабов бывают и рукотворными, и полностью природными. У природных материалов есть преимущество: они лучше совместимы с живым организмом — тело опознаёт их и, скорее всего, не отторгнет. Вот почему некоторые ученые рассматривают ДНК как возможный транспорт лекарств в клетку. К примеру, заключить молекулу лекарственного вещества внутри ловушки из ДНК, у которой «замочек» открывается лишь правильным «ключиком» — специфическими молекулами на поверхности раковой клетки.

## В сухом остатке:

## Мелюзга — но каков эффект



# 46 Графен

Никто не догадывался, что в куске графита, практически того самого, что в простых карандашах, содержится суперматериал такой прочности, тонкости, гибкости и электропроводности, что даст фору любому другому из известных на этой планете. Никто не знал, что добыть его окажется так просто. Никто не подозревал, что этот материал напроочь изменит наши мобильные телефоны.

**Н**икто — кроме Андрея Гейма, одного из лауреатов Нобелевской премии по физике 2010 года, назвавшего свою нобелевскую лекцию «Случайное блуждание к графену». По его собственному признанию, он занимался множеством безуспешных проектов многие годы, более или менее «от фонаря». В своей речи в Стокгольмском университете Гейм сказал: «Примерно за 15 лет состоялась пара десятков экспериментов, и, как и ожидалось, — в основном чудовищно провальных. Но три попадания в яблочко все же произошло: левитация, лента гекко и графен». Из этих трех открытий интереснее всего вроде бы первое и второе, однако именно графен взял научный мир кавалерийским наскоком.

Графен часто называют сверхматериалом, и это первое и самое поразительное вещество среди так называемых наноматериалов, единственная субстанция, состоящая из одного слоя атомов. Это полностью углеродное вещество, которое можно изготавливать слоем толщиной в один атом, на планете нет ничего легче — и крепче. Из одного квадратного метра графенового листа — толщиной в один атом, не забудем, — получится гамак, крепости и гибкости

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1859**

Бенджамин Броди открывает «графон», ныне известный нам как оксид графена

**1962**

Ульрих Хофманн и Ханс-Петер Бём обнаруживают тончайшие фрагменты оксида графена с помощью просвечивающего электронного микроскопа

**1986**

Бём вводит понятие «графен»

которого хватит на целого кота, хотя весить он сам будет, как один кошачий ус. Графеновый гамак для кота будет еще и прозрачным — полное впечатление, что кот висит в воздухе, а электричество этот гамак будет проводить лучше меди. Если верить рекламному шуму, графен положит конец нашим страданиям с телефонными зарядками и позволит нам заряжать электромобили за считанные минуты.

**ГРАФЕН БЫЛ У НАС БУКВАЛЬНО ПЕРЕД ГЛАЗАМИ, У НАС ПОД НОСОМ, МНОГО ВЕКОВ ПОДРЯД, НО НИКТО НЕ ПОНИМАЛ, ЧТО ОН ТАКОЕ**

Андрей Гейм (р. 1958),  
советский, нидерландский и британский физик

## БУДУЩЕЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

Гейм, конечно, не претендует на открытие этого суперматериала: о его существовании знали другие химики и даже были близки к его получению, однако он и его коллега по Нобелевской премии Константин Новоселов обнаружили надежный, хоть и коммерчески сомнительный метод получения графена из графита. Они попросту взяли кусок графита (см. с. 112) и сняли с его поверхности слой графена с помощью клейкой ленты. Графит — та же штука, из которой делают грифели для простых карандашей, и это попросту стопка сотен тысяч графеновых листов с довольно слабыми связями между ними. Гейм с Новоселовым этого не понимали, пока не пригляделись к куску клейкой ленты, которой чистили кусок графита.

Хотя есть некоторые разногласия в том, кто и когда именно первым выделил графен, нет никаких сомнений, что статьи, которые будущие нобелевские лауреаты опубликовали в 2004 и 2005 годах, многое изменили в представлениях ученых об этом материале. До той поры кое-кто не верил, что лист углерода в один атом толщиной окажется устойчивым. В исследовании 2005 года были проверены необычайные качества графена как электропроводника, и теперь они вызывают пристальный интерес. Всяких слов про графеновые транзисторы и гибкую электронику, в том числе и про гнущиеся телефоны и солнечные батареи, прозвучало немало.

### 1995

Томас Эббесен и Хидефуми Хиура рассуждают о воображаемой графеновой электронике

### 2004

Андрей Гейм и Константин Новоселов публикуют метод получения графена из графита

### 2013

Махер Эль-Кадди и Ричард Кейнер обнародуют метод создания суперконденсаторов (ионисторов) на основе графена посредством DVD-рекордера

## Графеновые теннисные ракетки

Графен — это не только электрические свойства: все, что в триста раз крепче стали и весит при этом меньше миллиграмма на квадратный метр, наверняка имеет и другие применения. Вот поэтому в 2013 году производитель спортивного инвентаря ХЕД объявил о включении графена в ручки новых теннисных ракеток. С такой ракеткой Новак Джокович победил в Открытом чемпионате Австралии в том же году. Тут не угадаешь, это он из-за графена выиграл или сам по себе, но способ рекламировать ракетки отменный.

В 2012 году двое исследователей из университета Калифорнии в Лос-Анджелесе объявили, что создали микросуперконденсаторы на базе графена — наподобие малюсеньких долгоиграющих батареек, заряжающихся за несколько секунд. Аспиранту Махеру Эль-Кадии удалось обеспечить электролампочку энергией на целых пять минут, зарядив ее за несколько секунд посредством фрагмента графена. Эль-Кадии и его научный руководитель Ричард Кейнер вскоре нашли способ изготавливать такие приборы с помощью лазера в DVD-рекордере и намерены создать производственный аналог, чтобы можно было интегрировать эти крохотные

источники энергии во что угодно, от микрочипов до имплантатов типа кардиостимуляторов.

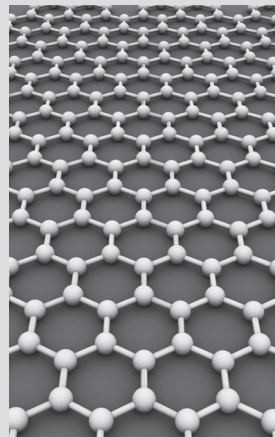
## ГРАФЕНОВЫЙ СЭНДВИЧ

Прекрасная электропроводность графена объясняется тем, что каждый углеродный атом в этой плоской сетчатой структуре располагает одним свободным электроном. Эти вольные электроны носятся по поверхности как переносчики заряда. Загвоздка, скорее, в чрезмерной электропроводности графена. Полупроводниковые материалы типа кремния (см. с. 96), которые производители чипов применяют для создания микросхем, полезны тем, что они проводят электричество лишь при определенных условиях, то есть их проводимость можно включать и выключать. Вот почему ученые добавляют в графен примеси — или даже переключают его сверхтонкими слоями других веществ, чтобы получались материалы с более управляемыми электрическими свойствами.

Еще одно неудобство: производить графен в массовых количествах не просто и недешево. Разумеется, распускать куски графита на графеновые простыни скотчем непрактично. В идеале материаловедам бы разработать способ получения больших листов. Один из наиболее успешных методов — химическое осаждение из газовой фазы, то есть образование слоя атомов на некой поверхности, но этот метод требует сверхвысоких

## Сетчатое устройство

Структуру графена часто называют сеткой. Как и в графите, углеродные атомы располагаются одноатомным плоским слоем и скреплены между собой крепкими связями, которые не просто разорвать. Каждый углеродный атом связан с тремя другими, так получается узор из шестиугольников. В результате один электрон из четырех оказывается «не при деле». Сетчатая структура обуславливает крепость графена, а свободные электроны — проводимость. Углеродные нанотрубки (см. с. 180) имеют похожее устройство, только сетка у них свернута в тубус. Поскольку графен всего в один атом толщиной и совершенно плоский, его считают двумерным материалом — в отличие от почти всех прочих, трехмерных. А раз состоит он исключительно из углерода, а это четвертый по распространенности элемент на Земле, графен необычайно привлекателен: вряд ли он у нас когда-нибудь истощится.



температур. Другие способы, подешевле, еще пока в стадии разработки, и в них применяются промышленных масштабов блендеры или отделение слоев графена от графитовой массы ультразвуком.

### КТО-ТО ЗАИКАЛСЯ О ЛЕВИТАЦИИ?

Это все про графен. А что там Гейм говорил про другие свои эксперименты? Он заставил левитировать воду, просто так вылив ее в лабораторную электромагнитную установку. А еще он левитировал лягушку в пузыре воды. А лента гекко должна была, по замыслу, имитировать липучую кожицу на лапках геккона, но увы, так здорово, как у ящерицы, сделать не вышло, и эта задумка признания не получила.

**В сухом остатке:**

**Сверхматериал  
из чистого углерода**

# Трехмерная печать

Печать на первый взгляд не очень увлекательный предмет, но это если забыть о необычайных возможностях трехмерной печати. От пластмассовых автомобилей до бионических ушей из гидрогелей — почти ничто не ограничивает потенциал этой новой методики, и инженеры аэрокосмической промышленности уже печатают металлические части ракет и самолетов.

**С** XX века главное в производстве чего угодно — массовость. Вы придумываете продукт, который, кажется, понравится в среднем любому человеку, а затем отыскиваете способ производить этот продукт массово. Массовое производство автомобилей. Вишневых пирогов. Компьютерных чипов.

Что же ждет нас в веке XXI? Массовое индивидуальное производство — продукты потребления по заказу, подогнанные под индивидуальные нужды и доставляемые массово. Нам больше не надо будет соглашаться на стандартные продукты, ориентированные на «среднего человека» (то есть ни на кого конкретно). Хотите приспособить сиденье у себя в авто, чтобы ездить вам было действительно удобно — и без всяких там рычагов? Массовое индивидуальное производство даст вам такую возможность. Как же производителю дать каждому потребителю то, что он хочет? Трехмерной печатью.

## МНОГООБЕЩАЮЩАЯ ПЕЧАТЬ

Печать издавна была вотчиной химиков. Тысячи лет назад чернила для письма изготовляли из природных материалов, и пигментом в них обычно служил углерод. Ныне чернила для печати — сложные

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1986**

Чарлз Халл основывает «3D Системз» и получает патент на стереолитографию

**1988**

«3D Системз» рекламирует первый коммерческий стереолитографический аппарат SLA-250

**1990**

Скотт Крамп получает патент на моделирование послойным наплавлением

смеси веществ, в том числе пигментов, смол, противопенных добавок и загустителей. Меж тем оборудование для трехмерной печати печатает из чего угодно — от пластмасс до металлов. Некоторые трехмерные принтеры могут работать лишь с каким-нибудь одним материалом — подобно черно-белым принтерам на бумаге, но есть и такие, что умеют сочетать разные материалы в одном предмете (подобно цветной печати на одном и том же принтере).

**“ВООБРАЗИТЕ, ЧТО ВАШ ПРИНТЕР ПОДОБЕН ХОЛОДИЛЬНИКУ, ГДЕ ПОЛНО ВСЯКОЙ ЕДЫ, ИЗ КОТОРОЙ МОЖНО СОСТРЯПАТЬ ЛЮБОЕ БЛЮДО ПО РЕЦЕПТАМ ДЖЕЙМИ ОЛИВЕРА”**

Лерой «Ли» Кронин (р. 1973),  
британский химик

Общее у всех технологий трехмерной печати одно: они выстраивают заданные им предметы послойно на основе информации из цифрового файла, который содержит описание двумерных сечений предмета. Системы компьютерного проектирования (САПР) позволяют создателям конечных продуктов разрабатывать сложные дизайны и печатать их быстро, а не кропотливо собирать из миллиарда деталек. Предел мечтаний аэрокосмических инженеров — напечатать спутник. Но кое-какие штуки, уже печатаемые трехмерно, все равно поражают воображение: бионические уши, черепные имплантаты (см. с. 191), компоненты ракетных двигателей и наномашин, не говоря уже о полноразмерных демонстрационных автомобилях.

## ЧЕРНИЛА ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Печать предметов типа автомобилей или ракетных двигателей с высокой надежностью потребует развития методик печати из металла. Эта область интересует ребят из НАСА, а также из Европейского космического агентства, начавшего проект под названием «Эмейз» («Удиви») по печати деталей ракет и самолетов. Преимущества — экологичность, нуль отходов, возможность печатать гораздо более сложные металлические детали, поскольку выводятся они послойно.

Процесс трехмерной печати и «чернила» зависят от выбранной методики. Уже разрабатывается целый спектр разных способов трехмерной печати. Ближе всего к старой доброй бумажной трехмерная струйная печать:

**1993**

Исследователи из МТИ первыми называют свой прибор 3D-принтером

**2001**

Трехмерные предметы печатают струйным принтером

**2013**

НАСА объявляет о тестировании форсунок ракетного двигателя, произведенных трехмерной печатью

**2014**

Пациенту с болезнью костей вживляют в череп трехмерно напечатанный имплантат

## Печать веществ

Группа ученых из университета Глазго пробует применить трехмерную печать в производстве миниатюрных химических наборов, в которые можно впрыскивать реагенты-«чернила» и изготавливать сложные большие молекулы. Одно потенциальное применение таких систем — производство лекарств на заказ и дешево, по инструкции, выдаваемой «программой» разработчика лекарства.

слои порошков и связующих материалов закладываются поочередно и образуют разнообразные материалы от пластмасс до керамики.

Стереолитография же, к примеру, применяет луч УФ-света для активации смол. Этот луч врисовывает дизайн в смолу, слой за слоем, и она застывает в заданной форме. В 2014 году исследователи из университета Калифорнии, Сан-Диего, применили этот метод в попытке напечатать биосовместимый прибор из гидрогеля, который мог бы заменить человеческую печень — улавливать яды в крови.

Но шире всего распространена, вероятно, методика печати послойным наплавлением — последовательным наложением полурасплавленных материалов. Пластмассы нагревают, после чего напрямую подают в сопло. Немецкая производственная компания

ЭДАГ разработала метод производства автомобиля футуристического вида под названием «Генезис» из термопластика, послойным наплавлением, но с некоторыми усовершенствованиями, и объявила, что сможет аналогичным способом производить сверхлегкие и сверхкрепкие кузова из углеродного волокна. Раз «Боинг» уже создает детали своего «Дримлайнера» из углеволокна, почему бы не напечатать трехмерно целый самолет?

## В МАЛЫХ МАСШТАБАХ

Трехмерная печать меняет наши представления о дизайне и производстве, и в громадном, и в крошечном. Микропроизводство электронных приборов (см. с. 96) — одна из многообещающих областей, и в самом деле уже возможна печать микросхем и малюсеньких приспособлений на литиевых батарейках. Энтузиасты-электронщики обрели возможность быстро придумывать и создавать индивидуализированные микросхемы. Краудфандинговая платформа «Кикстартер» помогла компании «Картезиан» разработать принтер, способный печатать микросхемы на различных материалах, в том числе и на тканях, и так создавать электронику, которую можно носить на себе, как одежду.

Нанотехнологии уже нацелились печатать наноприборы. По одной методике можно печатать молекулами по поверхности с помощью зонда атомного силового микроскопа. Впрочем, контролировать поток «чернил» в таких

## Трехмерная печать частей тела

В сентябре 2014 года в журнале «Прикладные аспекты материалов и поверхностных явлений» появилась статья, сообщающая, что группа австралийских химиков и инженеров создала трехмерной печатью имитацию хрящевой ткани человека. Австралийцы взяли в качестве исходного материала гидрогели с высоким содержанием воды и укрепили их пластмассовым волокном. Оба компонента были впечатаны в конечную форму одновременно в жидком виде, а затем их отвердили УФ-светом. В результате получился крепкий, но гибкий композит (см. с. 168), очень похожий на хрящевую ткань. Впечатляет? Это вы еще не слышали о пациентах, у которых в черепе теперь напечатанные трехмерно имплантаты. В 2014 году Университетский медицинский центр в Утрехте, Нидерланды, объявил, что одной пациентке с болезнью костей (утолщением черепных пластинок, от которых уже случился ущерб мозгу) заменили значительную часть черепа — аналогом, изготовленным трехмерной печатью. Один китаец, лишившийся половины черепа при несчастном случае на стройке, теперь ходит с новеньким, отпечатанным из титана. Из всего этого следует, что можно печатать индивидуализированные имплантаты любому пациенту.



масштабах все еще затруднительно. Возможное решение — электроспиннинг, то есть натягивание заряженного полимера на противоположно заряженную запечатываемую поверхность. Чтобы материал приклеивался в точности туда, куда надо, в поверхность можно вживить схему.

Неудивительно, что все так увлеклись трехмерной печатью: ее творческие возможности неисчерпаемы. Есть очевидные преимущества у нее и с точки зрения потребителя: долой массовое производство, даешь автомобили из углеродного волокна с идеально подогнанными креслами — и безупречно подходящие протезы.

## В сухом остатке:

# Индивидуальные творения, слой за слоем



# Искусственные мышцы

Как можно извлекать колоссальную энергию из того, что на вид хлипкое? Вспомните тощих велосипедистов, покоряющих горы на маршруте «Тур де Франс». Вся штука в удельной мощности, но как это воспроизвести искусственно? Область разработки искусственных мышц уже создает материалы с еще более поразительными показателями.

**Е**сли вам когда-нибудь приходилось беседовать с более-менее приличным велосипедистом, вы знаете, что эти ребята повернуты на своих показателях. Они постоянно отслеживают среднюю скорость и подсчитывают расстояния и высоту расположения маршрута. Они делятся своими данными через мобильные приложения и состязаются за титул «царя горы» — за рекорд скоростного въезда на возвышенность. Но главное — они одержимы своей удельной мощностью. Любой велосипедист, достойный своих педалей, знает: чтобы выиграть «Тур де Франс», нужна удельная мощность около 6,7 ватт на килограмм (Вт/кг).

Для нас, простых смертных, это означает, что нужно жать на педали со всей дурацкой мочи и при этом быть таким тощим, чтобы со стороны казалось, что любой порыв ветра сдует вас из седла. Четырехкратный олимпийский чемпион Брэдли Уиггинз, выигравший в 2011 году «Тур де Франс», — отличный пример. В те поры худосочный Уиггинз весил примерно 70 кг и выдавал примерно 460 ватт мощности. (Вроде впечатляюще, но, чтобы запитать ваш фен, понадобится как минимум два таких Брэдли Уиггинза.) Это значит, что

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1931**

Открытие полиэтилена

**1957**

163-килограммовый штангист Пол Эндерсон поднимает 2844 кг из положения стоя

**2009**

Мышечный гель заставляет «ходить» посредством химической реакции

на каждый килограмм своего тела Уиггинз мог генерировать 6,6 ватт мощности и, следовательно, его удельная мощность 6,6 Вт/кг.

## МОЩНОСТЬ К ВЕСУ

Схожая одержимость соотношением мощности к весу наблюдается и в автомобильной промышленности: в 2007 году «порше-911» выдавал примерно 271 Вт/кг. Важна эта пропорция и для разработчиков искусственных мышц. Десятки лет материаловеды пытались разработать материалы и механизмы, способные на движение подобно человеческим мышцам, но хотелось бы, чтобы у них еще и удельная мощность была высокая. В таких материалах таится заманчивая перспектива создания сверхмощных роботов с интересной мимикой.

**ХОТЯ ГЕЛЬ НАЦЕЛО СОСТОИТ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРА, ОН СПОСОБЕН К САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ДВИЖЕНИЮ, КАК ЖИВОЙ**

Синго Маэда и коллеги,  
из «Международного журнала  
молекулярных наук» (2010)

Современные технологии способны создать робота, который может поднимать немалый вес или, скажем, ехать в горку на скорости, близкой к звуковой, но робот этот будет довольно громоздок, иначе не выдаст нужную мощность. В идеале — разработать робота, который занимает немного места, но зато генерирует зверскую мощность. (А когда вы приложите все нужные усилия, чтобы создать такого робота и оборудовать его необходимыми мышцами, можно задействовать кое-какие из них, чтобы робот улыбался или корчил рожи.)

## СОКРАТИТЬ И ВЫТЯНУТЬ

Следующий вопрос: как создать крохотные, но сверхмощные мышцы? Неудивительно, что дело это непростое. Перво-наперво, нужно подобрать материал, который быстро растягивается и сжимается, как настоящая мышца, а еще надо, чтобы он был крепче стали, но при этом гнулся. Далее нужно придумать, как подать в этот материал энергию. С Брэдли Уиггинзом-то все понятно: у него ножные мышцы и так состоят из клеток, производящих химическую энергию, ему остается лишь поставлять топливо и кислород, а это он делает, попросту питаясь и дыша. С роботами же все иначе.

**2011**

Удельная мощность  
Брэдли Уиггинза 6,6 Вт/кг

**2012**

Искусственные мышцы  
из нанотрубчатой «пряжи»

**2014**

Полиэтиленовые мышцы  
с удельной мощностью 5300 Вт/кг

## Полиэтиленовая мощность

Искусственные мышцы, созданные химиком Реем Бафменом и его коллегами в 2014 году, сделаны из четырех полиэтиленовых лесок, перекрученных в прядь толщиной 0,8 мм. И все же эта тонкая веревочка, сделанная не из каких-нибудь там футуристических материалов, а из полимера, придуманного 80 лет назад и стоящего 5 долларов за килограмм, смогла поднять вес средних размеров собаки. При этом сократилась она вполтину. Как едва видимая прядь лесок может поднять 7 кг массы? Ответ: спасибо перекручиванию и укладыванию петлями. Полиэтилен делается торсионным материалом и может выдерживать куда большие нагрузки. Многие искусственные мышцы запитаны электричеством, но полиэтиленовые волокна откликаются просто на смену температуры. Чтобы они сократились, нужно их нагреть, а охлаждаясь, они распрямляются. «Мышцы» можно поместить в трубки, и тогда их можно быстро охладить водой. Но, чтобы получалось похоже на быстрые сокращения настоящих мышц, необходимо менять температуру очень споро.



Искусственные мышцы, именуемые также актуаторами, изготовлены преимущественно на основе полимеров. Ученые, исследующие электроактивные полимеры, трудятся над созданием мягких материалов, которые меняют форму и размер под действием электрического тока. Уже есть массово производимые кремниевые и акриловые материалы (эластомеры). Есть и ионные полимерные гели, которые набухают или сжимаются в ответ на электрический стимул или смену химических условий. Любая искусственная мышца требует питания, но материалы, работающие на электричестве, требуют постоянного энергоснабжения, иначе они не двигаются.

В 2009 году, впрочем, японские исследователи заставили кусок полимерного геля «идти» без посторонней помощи, на чистой химии — на аналоге классической реакции Белоусова-Жаботинского. В этой реакции ионы дипиридил-рутения участвуют в колебательной реакции, которая влияет на состояние полимера в геле — заставляет его молекулы сокращаться и вытягиваться. В изогнутом образце геля получается самостоятельное движение, исследователи так и написали: «Как будто он живой». Подобно неторопливой гусенице, ползущей не спеша по поверхности, движение это быстрым не было, зато совершенно завораживало.

## КРУТИМ-ВЕРТИМ

Более передовые — и куда более дорогие — материалы получается делать из углеродных нанотрубок (см. с. 180). За последние два года эти материалы почти добрались

до вершин сверхпрочности, сверхскорости и сверхлегкости и могли бы, честно говоря, посрамить самого Уиггинза. В 2012 году международная группа исследователей, в том числе из Института нанотехнологий университета Техаса, Даллас, объявила о создании искусственных мышц на основе углеродных нанотрубок, скрученных в пряди, скрепленные воском. Такие наноуглеродные пряди выдерживают нагрузку, в 100 000 раз превышающую их массу, и сокращаются за 0,025 секунды под действием тока. Такие сумасшедшие показатели соответствуют удельной мощности в 4200 Вт/кг. Это на несколько порядков выше мощности человеческой мышечной ткани.

Нанотрубки — один из крепчайших материалов, известных человечеству, однако стоит эта субстанция несколько тысяч долларов за кило. Исследователи вознамерились поискать материал подешевле и вернулись к расчетам. Через два года они заявили, что повторили собственный подвиг, применив скрученные полиэтиленовые лески. Получившиеся дешевые искусственные мышцы потребляли тепловую энергию и могли поднимать 7,2 кг даже при своей толщине менее миллиметра. Мощность этого прямо-таки хит-робинсоновского\* прибора составила 5300 Вт/кг. Так-то, Брэдли Уиггинз!

### Не роботам одним

Помимо лицевых ужимок для роботов (и подъема тяжестей), для чего еще нужны искусственные мышцы? Есть соображения о человеческих экзоскелетах, точной микрохирургии, ориентации солнечных батарей, а также одежде с порами, которые могут закрываться и открываться по погоде. Пряха полимерных мышц может сокращаться и расслабляться в ответ на перемену температуры, а значит, можно создать ткань, которая и впрямь «дышит». Похожие соображения вдохновляют и разработку самооткрывающихся ставней и жалюзи.

\* Уильям Хит Робинсон (1872–1934) — английский карикатурист и иллюстратор; рисовал нелепо громоздкие и сложные приспособления для выполнения простейших задач.

**В сухом остатке:**  
**Материалы, подобные мышцам**

Развитие химического синтеза ДНК означает, что ученые теперь умеют клепать геномы на свой вкус и создавать организмы, которых нет в природе. Смело, а? Однако создание синтетических организмов с нуля может однажды стать не сложнее, чем положить один кирпич на другой.

**Б**иологи-синтетики рецептам не следуют. Но не на кухне у себя они импровизируют, не чили-кон-карне готовят, а творят в лаборатории жизнь. И пусть их создания все еще соответствуют поваренной книге природы, у этих ученых смелые планы. В будущем они собираются создать синтетический биологический эквивалент чили-кон-карне, приготовленный из крокодильего мяса с бобами эдамамэ, и ни вы, ни я известное нам блюдо не опознаем.

### ПЕРЕИЗОБРЕТЕНИЕ ПРИРОДЫ

Юная отрасль синтетической биологии родилась из стремления биологов усовершенствовать природу, отредактировав геномы живых организмов. Все началось с геной инженерии — методик, оказавшихся полезнейшими в исследовании животных и в попытках разобраться, как определенные гены влияют на развитие заболеваний. Ныне параллельно с достижениями в секвенировании и синтезе ДНК происходит работа с целым геномом.

**МЫ СКОРО СМОЖЕМ ПИСАТЬ ДНК.  
ЧТО МЫ ЗАХОТИМ СКАЗАТЬ?**

Эндрю «Дрю» Дэвид Энди (р. 1970),  
американский биолог-синтетик

Традиционная геновая инженерия меняет отдельный ген и смотрит, к каким последствиям это приведет у животного, растения или бактерии: синтетическая биология редактирует тысячи «букв» (оснований) в коде ДНК и вводит гены, кодирующие

### СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1983	1974	2003	2004
ПЦР — быстрый новый способ синтеза ДНК	Составлен геном дрожжей	Начато ведение Каталога стандартных биологических составляющих	Первый международный съезд по синтетической биологии в МТИ

целые метаболические последовательности молекул, которые организм прежде не ведал. Один из первых таких проектов, возвестивших о победе синтетической биологии, — пересоздание дрожжей, способных производить вещество-предшественник для антималярийного препарата артемизинина. Французская фармацевтическая компания «Санофи» в 2013 году наконец запустила производство этой полусинтетической версии лекарства и поставила себе цель в 150 миллионов излечений в 2014 году. И все же ученые предпочли считать это затейливым генно-инженерным проектом, поскольку изменены были всего несколько генов. Впечатляюще, спору нет, но до планки редизайна «крокодил с эдамамэ» пока далеко.

## ДНК с нуля

Прорыв в синтезе ДНК, приведший к значительному снижению стоимости, — разработка процесса химического синтеза с участием мономеров амидофосфитов. Каждый такой мономер — нуклеотид (см. «ДНК», с. 140), как те, что составляют обычную ДНК, с той лишь разницей, что у них реакционная часть защищена эдакой «шапочкой». Эту защиту можно снять кислотой непосредственно перед тем, как присоединить новый нуклеотид к растущей цепи ДНК. Первый нуклеотид с нужным основанием (А, Т, Ц или Г) прикреплен к стеклянному зерну. Новые нуклеотиды добавляются в циклическом процессе снятия защиты и спаривания, в запланированном исследователями порядке. Обычно получается собрать лишь небольшие фрагменты. Затем их соединяют друг с другом. Разумеется, код может не иметь ничего общего



ни с одним существующим в природе — совершенно новое творение. Химия амидофосфитов сейчас главенствует в синтезе ДНК, и ожидается, что резкое сокращение продолжительности и стоимости синтеза породит новую химию. Возможны и другие пути синтеза ДНК, но ни один пока не стал коммерческим.

**2006**

Цена синтеза ДНК падает ниже 1 доллара

**2010**

Крейг Вентер и коллеги размещают синтетический геном внутри клетки

**2013**

Выпуск полусинтетического препарата от малярии (артемизинина), произведенного внутри дрожжевой клетки

**2014**

Создание первой синтетической хромосомы для сложного (эукариотического) организма — дрожжей

### Опасная головоломка

В 2006 году репортеры из «Гардиан» ухитрились купить через интернет ДНК черной оспы. Слякка, которую они получили по почте, содержала лишь фрагмент генома оспы, но газета заявила, что какой-нибудь террористической группе с приличным финансированием «понадобится лишь сделать заказ на достройку остатка ДНК и склейку фрагментов воедино и создать смертоносный вирус». Компании, синтезирующие ДНК, теперь отслеживают все заказы на опасные последовательности, но некоторые ученые говорят, что образцы настолько смертоносных организмов необходимо уничтожать.

### ДНК почтой

Меж тем Крейг Вентер, генетик, известный своим участием в секвенировании генома человека, работает над полностью синтетическим геномом. В 2010 году его группа в Институте Крейга Вентера объявила, что собрала (с минимальными изменениями) геном микроорганизма, паразитирующего на козах, — *Mycoplasma mycoides*, — и поместила его в живую клетку. Синтетический геном Вентера, по сути, копия настоящего, но он все равно доказал возможность создания жизни исключительно на синтетически полученной ДНК.

Все это стало возможным только благодаря развитию наших способностей

«читать и писать» ДНК, а значит, мы научились секвенировать и химически синтезировать последовательности ДНК быстро и довольно дешево. За годы, которые Вентер и его конкуренты расшифровывали человеческий геном (1984–2003), цена и секвенирования, и синтеза ДНК значительно снизилась. По разным оценкам, ныне можно заказать секвенирование целого человеческого генома, состоящего из более чем трех миллионов оснований, всего за тысячу долларов, а синтез ДНК стоит 10 центов за одно основание.

Такое удешевление позволило биологам-синтетикам добыть инструкции по созданию многих организмов, которые можно было бы перепроектировать — или украсть у них что-нибудь, — а также опробовать свои проекты в творении организмов совершенно новых. Биологам-синтетикам даже ДНК самим нанизывать не надо. Довольно послать запрос на сборку той или иной последовательности в компанию, занятую синтезом, и получить заказ по почте. Вроде жульничество, но, если вспомнить метафору с чили-кон-карне, это, в общем, равносильно покупке готового острого соуса и дальнейшему приготовлению вашего мексиканского кулинарного шедевра, без хлопот со свежим перцем и тминными зернами.

## СТАНДАРТНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Еще один способ, которым биологи-сингетики собираются сократить себе хлопоты, — составление базы данных по стандартным частям генома, из которых можно собрать синтетический. Такой каталог уже разрабатывается — с 2003 года. Все не так отвратительно, как звучит: «Каталог стандартных биологических составляющих» — сборник тысяч проверенных генетических последовательностей, составленный по данным сообщества биологов-синтетиков. Смысл в том, чтобы иметь данные о сочетании фрагментов генома с изученными функциями, состыковывать их, как кирпичи, и так строить действующие организмы с нуля. Один такой кирпич, допустим, кодирует пигмент, а другой — генетический выключатель, активирующий в присутствии определенного вещества целую серию ферментов.

Конечная цель синтетической биологии — научиться собирать геномы спроектированных человеком организмов, способных производить новые лекарства, биологическое топливо, пищевые добавки и другие полезные вещества. Но не будем забегать вперед: нам до создания синтетических крокодилов для вашего крокодилового чили еще очень далеко. Из сложных организмов нам пока под силу творить грибы — и ничего затейливее.

Хотя пивные дрожжи вам могут показаться не слишком-то и революцией, на клеточном уровне у нас с грибами больше общего, чем с бактериями. Проект «Sc2.0» нацелен на создание заново придуманной синтетической версии дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* (см. с. 56), похромосомно. Работая по принципу «растаскиваем на запчасти, пока не развалится», международная группа исследователей пытается упростить геном, удаляя необязательные гены и добавляя маленькие фрагменты синтетического кода в природные дрожжи, а затем смотрит, по-прежнему ли жизнеспособен такой микроорганизм. Пока разобрались только с одной хромосомой. Результаты могут быть разрушительными (для дрожжей-то уж точно) или революционными, но группа надеется выяснить, как именно создать живой организм.

**В сухом остатке:**  
**Перепроектируем жизнь**



# Топливо будущего

**Что будет, когда ископаемое топливо закончится? Будем всё запитывать от солнечных батарей и ветряков? Необязательно. Химики трудятся над созданием топлив, которые не будут накачивать нашу атмосферу углекислым газом. Труднее другое: как производить их, не расходуя при этом ценнейшие ресурсы планеты.**

**О**бе величайшие технологические задачи планетарных масштабов связаны с топливом. Первая: ископаемое топливо исчерпывается. Вторая: сжигание ископаемого топлива наполняет атмосферу парниковыми газами, отчего меняется климат на всем земном шаре — к худшему. Решение ослепительно очевидно: прекратить использовать ископаемое топливо.

Уменьшение нашей зависимости от ископаемого топлива — это поиск других способов получения энергии. Энергия солнца и ветра заметно утоляет наши энергетические потребности, но энергия — не топливо: можно сдать излишки в национальную электросеть, но закачать ее в автомобиль и уехать — нет. Вот в чем преимущество ископаемого топлива: это энергия, хранящаяся в химическом виде.

Но электромобили же решили эту задачу? Почему бы не заряжать их солнечной энергией из электросети? Эх, ископаемое топливо — по-прежнему гораздо более эффективная форма энергии, в которой ее можно возить с собой.

В единицу массы нефтепродуктов помещается гораздо больше энергии, а значит, поди найди сопоставимый источник энергии для средств передвижения — например, для самолетов. Надеяться тут

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1800**

Электролиз воды, получение водорода

**1842**

Маттиас Шляйден выдвигает гипотезу о расщеплении воды фотосинтезом

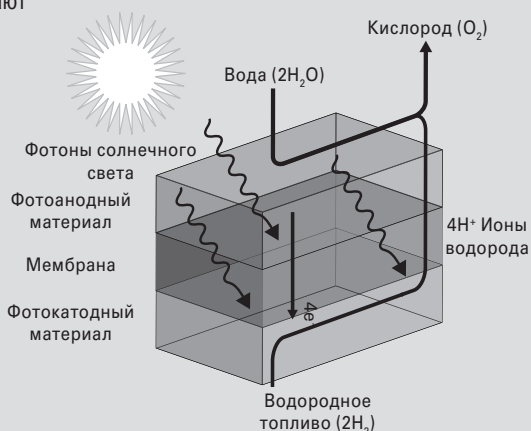
**1820-е**

Процесс Фишера—Тропша позволяет производить топливо из водорода и оксида углерода

## Искусственные листья

Искусственные листья («сплиттеры воды») в целом основаны на общей схеме, в которой каждая из двух частей реакции разложения воды протекает по отдельности. По сторонам реактора есть по электроду, реакционная емкость разделена надвое тонкой мембраной, которая не позволяет молекулам перемещаться туда-сюда. Электроды сделаны из полупроводниковых материалов, которые, как и кремний в солнечной батарее, поглощают энергию света. По одну сторону от мембраны катализатор, включенный в поверхность электрода, тянет на себе кислород из воды, а по другую — другой катализатор генерирует желанный водород, объединяя ионы водорода в молекулы, восстанавливая их электронами. Некоторые такие приборы работают на катализаторах, включающих в себя редкие дорогие металлы вроде платины, но идет поиск материалов подешевле, чтобы надолго хватило: материаловеды применяют высокоскоростной анализ

миллионов потенциальных катализаторов. Химикам необходимо оценивать не только каталитические способности этих веществ, но и их долговечность, цену и доступность материалов, необходимых для их производства. Некоторые исследователи даже проектируют такие катализаторы из органических молекул, которые растения применяют в фотосинтезе.



можно лишь на значительные инженерные прорывы и резкое сокращение массы производимых аккумуляторов, иначе можно городить фотоэлектростанции и ветряки сколько угодно, а горючее нам будет нужно по-прежнему. Более того, наши энергосистемы рассчитаны на топливо, а значит, если бы мы могли придумать экологичные альтернативные продукты, можно было бы эти системы не перегружать.

**1998**

В Национальной лаборатории возобновимой энергии создана неустойчивая искусственная листовая пластинка

**2011**

Разработана искусственная листовая пластинка с низким энергопотреблением и ценой производства в пределах 50 долларов

**2014**

Проект «Солар-Джет» демонстрирует процесс создания реактивного топлива из диоксида углерода, воды и солнечного света

## ВОДОРОДНАЯ ГОЛОВНАЯ БОЛЬ

Потенциальным решением может оказаться вещество с мельчайшими, простейшими частицами, элемент на вершине Периодической таблицы. Водород. Его уже применяют в ракетном топливе, и это решение — вроде бы идеальное. В автомобиле на таком топливе водород взаимодействует с кислородом внутри топливной ячейки, получается энергия и вода. Чисто, никаких тебе углеродов, но где найти бесперебойный источник водорода и как его таскать с собой без опасности для жизни? Хватит самой чуточки кислорода и искры — и получится немаленький взрыв.

Перво-наперво химикам нужно понять, как добывать прорву водорода. Уильям Николсон и Энтони Карлайл получили водород в 1800 году, сунув провода простенького аккумулятора в ванну с водой (см. с. 92). Воду

на кислород и водород, вообще-то, делят растения в процессе фотосинтеза. Как это часто бывает, химики пытаются стибрить идею у природы и создать искусственные листья.

**ВЕРНИТЕ НОГАМ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ  
ЗАДАЧУ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. ПЕШЕХОД  
ПОЛАГАЕТСЯ НА ТОПЛИВО В ВИДЕ  
ПИЩИ, И ЕМУ НЕ НУЖНО ОСОБЫХ  
ПАРКОВОЧНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Льюис Мамфорд (1895–1990),  
американский историк, философ

Искусственный фотосинтез вырос в эпический научный проект: правительства жертвуют сотни миллионов долларов на создание рабочей модели «водяного сплиттера».

По сути, это охота на материалы, способные

усваивать солнечный свет (как солнечные батареи), и на материалы, которые катализируют распад воды на кислород и водород. Задача — найти простые материалы, которые не стоят, как нынешняя запчасть от «Боинга», и не портятся через пару дней.

## ЗАДАЧКА СТАРАЯ, РЕШЕНИЕ — НОВОЕ

Допустим, мы освоим практическую часть задачи. Тогда мы сможем создавать из водорода более привычные нам формы топлива. Процесс Фишера—Тропша позволяет получать углеводородное топливо из водорода и оксида углерода, то есть из синтез-газа (см. с. 64). И тогда не придется городить отдельную инфраструктуру водородных автозаправок.

Однако можно и сам синтез-газ получать иначе: нагревать диоксид углерода с водой при 2200 °С и вырабатывать таким способом водород, оксид углерода и кислород. С таким подходом, правда, есть пара неувязок: во-первых, чтобы нагреть смесь до эдакой температуры, требуется много

энергии, а во-вторых, кислород — это всегда серьезный риск взрыва, если где-нибудь рядом есть водород. Некоторые новейшие практические приспособления для расщепления воды имеют дело с той же проблемой, поскольку не разделяют кислород и водород, получающиеся при распаде воды.

В 2014 году, впрочем, химики из европейского проекта «Солар-Джет» придумали нечто впечатляющее. Способом Фишера—Тропша они превратили синтез-газ в авиатопливо. Хотя получилось у них совсем чуть-чуть, все же это символическая веха, поскольку добились они своего с помощью «солнеч-

ного симулятора» — устройства, похожего на гелиоконцентратор. Гелиоконцентраторы — исполинские искривленные зеркала, фокусирующие свет в одну точку, где достигаются высокие температуры. Исследователи применили солнечное тепло, полученное таким способом, и получили синтез-газ — и тем обошли проблему энергии для процесса, а примененный как поглотитель кислорода оксид церия устранил опасность взрыва.

В общем, в некотором смысле химики задачу решили. С помощью неисчерпаемой солнечной энергии они уже создают чистое топливо, в том числе и авиационное. Впрочем, просто не будет все равно: остается придумать, как все удешевить, сделать надежным и не потратить по ходу дела все природные ресурсы. Ныне умная химия — это не просто получение того, чего наша душа пожелает. Это способы делать все так, чтобы работало вечно.

## Водородные рабы

Есть и такая идея: добывать водород с помощью зеленых водорослей, осуществляющих фотосинтез, или растений. Некоторые водоросли расщепляют воду и производят кислород, ионы водорода и электроны, а затем ферменты гидрогеназы сцепляют ионы водорода и электроны вместе, и получается газообразный водород. Можно было бы привлечь генных инженеров поработать с этими водорослями, чтобы те давали больше водорода. Ученые уже определили несколько генов, значимых в этом процессе.

## В сухом остатке:

## Чистая, перемещаемая энергия

# Периодическая таблица

1

1.0

1

Н

Водород

2

6.9

3

Li

Литий

2

9.0

4

Be

Бериллий

3

23.0

11

Na

Натрий

3

24.3

12

Mg

Магний

4

39.1

19

K

Калий

4

40.1

20

Ca

Кальций

4

45.0

21

Sc

Скандий

4

47.9

22

Ti

Титан

4

50.9

23

V

Ванадий

4

52.0

24

Cr

Хром

4

54.9

25

Mn

Марганец

4

55.8

26

Fe

Железо

4

58.9

27

Co

Кобальт

5

85.5

37

Rb

Рубидий

5

87.6

38

Sr

Стронций

5

88.9

39

Y

Иттрий

5

91.2

40

Zr

Цирконий

5

92.9

41

Nb

Ниобий

5

96.0

42

Mo

Молибден

5

(98)

43

Tc

Технеций

5

101.1

44

Ru

Рутений

5

102.9

45

Rh

Родий

6

132.9

55

Cs

Цезий

6

137.3

56

Ba

Барий

6

Лантаниды

6

178.5

72

Hf

Гафний

6

180.9

73

Ta

Тантал

6

183.8

74

W

Вольфрам

6

186.2

75

Re

Рений

6

190.2

76

Os

Осмий

6

192.2

77

Ir

Иридий

7

(223)

87

Fr

Франций

7

(226)

88

Ra

Радий

7

Актиниды

7

(261)

104

Rf

Резерфордий

7

(262)

105

Db

Дубний

7

(266)

106

Sg

Сиборгий

7

(264)

107

Bh

Борий

7

(277)

108

Hs

Хассий

7

(268)

109

Mt

Мейтнерий

Группа

3

4

5

6

7

8

9

Элементы Периодической таблицы расположены в порядке увеличения атомных чисел, а также в соответствии с закономерностями в химических свойствах. Элементы, оказывающиеся друг под другом в столбцах, имеют сходные химические свойства; вдоль горизонтальных рядов (периодов) в целом увеличивается атомная масса.

† Лантаниды	138.9	57	140.1	58	140.9	59	144.2	60	(145)	61	150.4	62	152.0	63
	<b>La</b>		<b>Ce</b>		<b>Pr</b>		<b>Nd</b>		<b>Pm</b>		<b>Sm</b>		<b>Eu</b>	
	Лантан		Церий		Празеодим		Неодим		Прометий		Самарий		Европий	
‡ Актиниды	(227)	89	232.0	90	231.0	91	238.0	92	(237)	93	(244)	94	(243)	95
	<b>Ac</b>		<b>Th</b>		<b>Pa</b>		<b>U</b>		<b>Np</b>		<b>Pu</b>		<b>Am</b>	
	Актиний		Торий		Протактиний		Уран		Нептуний		Плутоний		Америций	

Элементы Периодической таблицы расположены в порядке увеличения атомных чисел, а также в соответствии с закономерностями в химических свойствах. Элементы, оказывающиеся друг под другом в столбцах, имеют сходные химические свойства; вдоль горизонтальных рядов (периодов) в целом увеличивается атомная масса.

Устройство ячейки:

Массовое число (изотопное среднее)	58.9	27	Атомное число
	<b>Co</b>		Символ
Название элемента	Кобальт		

										18	
										4.0	2
										<b>He</b>	
										Гелий	
										18	
										<b>Ne</b>	
										Неон	
										18	
										<b>Ar</b>	
										Аргон	
										18	
										<b>Kr</b>	
										Криптон	
										18	
										<b>Xe</b>	
										Ксенон	
										18	
										<b>Rn</b>	
										Радон	
										18	
										<b>Uuo</b>	
										Унуноктий	
										18	
										<b>Uus</b>	
										Унунсептий	
										18	
										<b>Lv</b>	
										Ливерморий	
										18	
										<b>Uup</b>	
										Унунпентий	
										18	
										<b>Fl</b>	
										Флеровий	
										18	
										<b>Cn</b>	
										Коперниций	
										18	
										<b>Rg</b>	
										Рентгений	
										18	
										<b>Ds</b>	
										Дармштадтий	
										18	
										<b>At</b>	
										Астат	
										18	
										<b>Po</b>	
										Полоний	
										18	
										<b>Bi</b>	
										Висмут	
										18	
										<b>Pb</b>	
										Свинец	
										18	
										<b>Tl</b>	
										Таллий	
										18	
										<b>Hg</b>	
										Ртуть	
										18	
										<b>Au</b>	
										Золото	
										18	
										<b>Pt</b>	
										Платина	
										18	
										<b>Ag</b>	
										Серебро	
										18	
										<b>Cu</b>	
										Медь	
										18	
										<b>Ni</b>	
										Никель	

157.3	64	158.9	65	162.5	66	164.9	67	167.3	68	168.9	69	173.0	70	175.0	71
<b>Gd</b>		<b>Tb</b>		<b>Dy</b>		<b>Ho</b>		<b>Er</b>		<b>Tm</b>		<b>Yb</b>		<b>Lu</b>	
Гадолиний		Тербий		Диспрозий		Гольмий		Эрбий		Тулий		Иттербий		Лютеций	
(247)	96	(247)	97	(251)	98	(252)	99	(257)	100	(258)	101	(259)	102	(262)	103
<b>Cm</b>		<b>Bk</b>		<b>Cf</b>		<b>Es</b>		<b>Fm</b>		<b>Md</b>		<b>No</b>		<b>Lr</b>	
Кюрий		Берклий		Калифорний		Эйнштейний		Фермий		Менделевий		Нобелий		Лоуренсий	

# Предметный указатель

B12, витамин 50, 114  
pH, шкала 46, 47

## А

авокут 169–170, 171  
автомобили 156–157, 159  
азот 68–69, 70  
алмазы 114, 115  
аминокислоты 75, 121,  
128–129, 130, 131, 142  
аммиак 68–71  
антибиотики 146–147  
антитела 131  
«Аполлон» 168  
арамида 169, 170  
Аррениус, Сванте 45  
артемизинин 147, 197  
астрохимия 124–127  
атомная экономика 79  
атомно-силовая  
микрокопия 35  
атомы 4–7, 9, 13, 20–23, 35

## Б

бактерии 154–155  
Бартлетт, Нил 16  
батареи 92, 93, 94  
Бафмен, Рей 194  
Беккерель, Александр  
Эдмон 174  
белки 128–131, 133, 134,  
142  
Белоусова-Жаботинского  
реакция 194  
бензин 156–159  
бензол 158  
биопластмассы 162, 163  
биополимеры 19  
биосинтез 65, 144–147, 178  
Бош, Карл 71  
Бранд, Хенниг 8  
Бэкон, Роджер 170  
Бюхнер, Эдуард 57

## В

Ван-дер-Ваальс 23  
Вентер, Крейг 198  
виагра 177, 179  
вискоза 64–65  
ВИЧ, лекарства от 135  
вода 18, 22–23, 27, 116–119  
и изменение климата 117  
и равновесие 37–38  
на Марсе 126

неотъемлемость  
от жизни 117–118  
новые фазовые  
состояния 27  
расщепление 93–94,  
201, 202  
тяжелая 12–13  
водород 12–13, 86, 202, 203  
водородные связи  
Вольта, Алессандро 93,  
94, 95  
восстановитель 55  
вычислительная химия  
108–111

## Г

Габера процесс 55, 68–71  
газы 24–25  
галихондрин В 177, 178  
Гейм, Андрей 184, 185, 187  
гелиоконцентраторы 203  
генетический код 142, 143  
генная инженерия 196–197  
геном человека 198  
гидрогенизация 51  
гидрофторуглероды 167  
глюкоза 138–139  
гормоны 135, 152, 153, 154  
Гоше болезнь 133  
графен 114, 174–175, 184–187  
графит 114, 115, 184, 185  
Гретцель, Михаэль 173  
губки 176–177

## Д

Даймонд Лайт Сорс 88, 91  
Дальтон, Джон 5  
Дерик, Линколн 96, 98, 99  
Джоуль, Джеймс Прескотт  
28–29, 30, 31  
диабет 107, 138  
ДНК 19, 83, 102–103, 122,  
136, 139, 140–143, 183,  
196, 197, 198  
допинг 98, 99  
дрожжи 57–58, 199  
Дэви, Гемфри 44, 45, 92, 94

## Ж

жидкие кристаллы 25, 26,  
102  
жидкости 24–25  
жизнь, происхождение  
120–123

## З

Заброшенного города  
теория 122–123  
загрязнение окружающей  
среды 158–159, 162  
«зеленая» химия 76–79

## И

изомеры 74  
изотопы 12–15  
инертные газы 10, 16  
интернет жизни 106, 107  
инфракрасная  
спектроскопия 87  
ионные каналы 153, 155  
ионы 6, 17, 19, 86–87, 94  
искусственные листья 201  
искусственные мышцы  
192–195

## Й

Йонат, Ада 89–90

## К

Карлайл, Энтони 93, 202  
Карплус, Мартин 108–111  
катализаторные  
конвертеры 49  
катализаторы 48–51, 57, 61,  
131, 132  
Каталог стандартных  
биологических  
фрагментов 199  
Кволек, Стефани 169, 170  
кевлар 169, 170  
Кейнер, Ричард 186  
керосин 60, 62  
Кеттринг, Чарлз 166  
Килби, Джек 96, 99  
кислород 5, 18, 45  
кислоты 44–47, 59  
клетки 34  
кобальт 48, 50, 51, 114  
композиты 168–171  
Кошленд, Дэниэл 134, 135  
крекинг 60–63, 67, 157, 161  
кремниевые чипы 96, 98,  
174, 186  
кремний 173, 186  
Крик, Фрэнсис 140–141, 143  
криминалистика 80–83  
кристаллография 50,  
88–91, 111  
ксенон 16

## Л

лаборатория на чипе  
104–107  
Лавуазье, Антуан Лоран  
44–45  
«лающая собака»,  
эксперимент 33–34, 35  
Ле Шателье, Анри Луи 68,  
69, 71  
Ле Шателье принцип 39,  
68, 70  
Либих, Юстус фон 33  
Лотербур, Пол 85–86  
Луна, высадка на (1969) 38

## М

Макговерн, Патрик 56  
мальтодекстрин 137–138  
Марс, жизнь на 126  
Мартин, Арчер 81  
масс-спектрометрия 82, 85,  
86–87  
межзвездное вещество 125  
метаболиты, вторичные  
145–146  
металлорганика 114  
метанол 58  
Миджли-мл., Томас 166  
микросборка 96–99, 105,  
190  
Миллер, Стэнли 121, 129  
Мишер, Фридрих 140–142,  
143  
младенцы, тестирование  
85, 87  
молекулы 17, 18, 24–25  
Молина, Марио 166–167  
молочной кислоты  
бактерии 59  
моль 45  
мощность, удельная  
192–193  
MPT 84  
мышцы, искусственные  
192–195

## Н

нанотехнологии 7, 101–102,  
179, 180–183, 190  
нанотрубки, электроника  
на 182, 187, 194–195  
наркотики 17–19, 109  
нейромедиаторы 154  
нейтроны 12–13

неорганическая химия 113  
нервные импульсы 152–153  
нефть 60–63, 155, 156, 157, 158  
никель 50–51  
Николсон, Уильям 93–94, 202  
нуклеин 140–142  
нуклеотиды 143, 197  
Ньюмен, Томас 183

**О**  
озоновый слой,  
дыра в 164–165, 166–167  
окисление 34, 52–54  
окисления-восстановления  
реакции 52–55, 69, 149, 158  
окислитель 55  
октановое число 159  
Оль, Расселл 174  
опреснение, «зеленое» 77  
органическая химия 113, 155  
«Орион», космический  
корабль 169, 171  
основания 45, 46

**П**  
Пастер, Луи 57  
паутина 129, 130  
пенициллин 144, 146  
первичный бульон,  
теория 121  
Периодическая таблица 8,  
9, 10–11, 21  
перовскиты 174, 175  
пивоварение 56–57, 58  
плазма 25  
пластмассы 60, 160–163  
полимеразная цепная  
реакция (ПЦР) 105  
полимеры 18–19, 194  
полициклические  
ароматические  
углеводороды (ПАУ)  
126–127  
полиэтилен 154, 161, 162–  
163, 194, 195  
половые гормоны 153  
потенциальная энергия 30  
приплюска 67  
простые вещества 8–11, 17  
протоклетки 123  
протоны 5, 6, 45  
пыль межзвездная 125–126

**Р**  
работа 29  
равновесие 36–39, 46  
радиация, виды 14  
радиоактивность 14–15  
разделение 80–83, 105  
рацемическая смесь 73  
рациональный дизайн 179  
рентгеновское  
излучение 88–89, 90,  
91, 111  
рентгеноструктурный  
анализ 50, 88–91, 111  
ржавление 34, 52, 53–55  
рибосома  
РНК 122, 136, 143  
Роулэнд, Шерри 166–167

**С**  
Сабатье, Поль 51  
Самнер, Джеймс 133–134  
самосборка 100–103  
сахара 135, 136–139  
сверхкислоты 47  
сверхлегкие автомобили  
171  
сверхтяжеловесы 11  
серебрение/золочение  
93, 94  
сетчатая структура 114, 187  
Силлимен, Бенджамин 61  
Синг, Ричард 81  
синтез-газ 65, 202–203  
синтетическая биология  
196–199  
сложные вещества 16–19,  
35  
«Смарт форвижн»,  
автомобили 175  
смеси 18  
солнечная энергия 151  
солнечные батареи 151,  
172–175  
соль 94  
спектры 84–87  
спирты 58  
сталактиты 39  
стереоизомеры 137, 177

**Т**  
талидомид 65–66  
твердое состояние  
вещества 24–25  
термодинамика 40–43  
тирский пурпур 145, 147

титана диоксид 126  
топливо  
авиа 62  
будущего 200–203  
ракетное синтетическое 65  
трехмерная печать 188–191  
**У**  
углеводороды 157–158  
углерод 7, 112–115  
углерод-14 14, 15  
углерода диоксид 113,  
150–151, 159  
углеродное волокно 170,  
171  
углеродные «бакиболы»  
114, 181  
углеродные нанотрубки  
187, 194–195  
Уиггинз, Брэдли 192  
Уотсон, Джеймс 140, 143

**Ф**  
фазовый переход 24–27,  
116  
Фарадей, Майкл 29, 181  
Фейнман, Ричард 180,  
182–183  
ферментация 56–59  
ферменты 49, 57, 78, 131,  
132–135  
философский камень 8  
Фишер, Герман Эмиль  
132–133, 134, 135, 137  
Фишера—Тропша процесс  
65, 202, 203  
Флеминг, Александр 144,  
146  
Форд, Генри 157  
фотокатализ 49, 51  
фотолитография 98–99  
фотосинтез 34, 52, 136, 139,  
148–151, 173, 202  
фотосистемы 150  
фотоэлектрический эффект  
174  
Фридляндер, Пауль 147  
Фрош, Карл 96–97, 98, 99  
Фрэнклин, Розалинд 143

**Х**  
Хаксли, Эндрю 152–153  
химическая библиотека  
178  
химические посредники  
152–155

химические реакции  
32–35, 50  
химические связи 18,  
20–23, 52  
химические  
уравнения 34  
химический синтез 64–67,  
178  
хиральность 72–75  
хлор 92, 95  
хлорфторуглероды 164–167  
Ходжкин, Ален 152–153  
Ходжкин, Дороти Кроуфут  
50, 89, 90–91  
холера 95  
хроматография 80–82

**Ц**  
цианобактерии 148  
цитруллинэмия 85

**Ч**  
Чедвик, Джеймс 13  
черепаховая кость 161  
чипы  
кремниевые 96, 98, 174,  
186  
лаборатория на 104–107  
создание 97

**Ш**  
Ши, Уильям 102, 103  
шоколад 26–27  
Шуховская башня 63

**Э**  
Эйглер, Дон 180  
эластан (спандекс) 66–67  
электричество 95  
электролиз 92–95  
электроника 114, 182,  
185–186  
электроны 5, 6, 10, 20–21,  
52  
электроспиннинг 191  
электрофорез 82, 83, 105  
электрохимия 44, 94–95  
Эль-Кади, Махер 185–186  
энантиомеры 72, 73, 74  
энергия 28–31, 41–42  
энтропия 42, 43  
Энэтэс, Пол 76, 77, 78–79  
этанол 58  
этилен 154, 161

**Я**  
ЯМР 84, 85–86, 109, 110



## БЛАГОДАРНОСТИ

Громадное спасибо всем членам Химической сверхкомиссии за соображения и советы по тексту этой книги — Рейшелль Бёркс (@DrRubidium), Деклану Флемингу (@declanfleming), Сюз Кунду (@FunSizeSuze) и Дэвиду Линдзи (@DavidMLindsay). Редакция журнала «Химистри Уорлд» тоже оказала неоценимую помощь и поддержку: спасибо Филипу Бродуиту (@broadwithpr), Бену Валслеру (@BenValsler) и Патрику Уолтеру (@vince0noir). Отдельная благодарность Лиз Белл (@liznewtonbell) — за проверки на здравый смысл и веселуху с таблицами в последние две недели подготовки текста, а также, как обычно, Джонни Беннетту — за всякую подкормку и полив, не говоря уже обо всем прочем. И наконец, спасибо вам, Джеймс Уиллз и Керри Энзор, — за понимание в некоторые трудные дни в начале проекта, а также благодарю Ричарда Грина, Джэйлза Спэрроу и Дэна Грина — вы помогли довести начатое до завершения.

## ИЛЛЮСТРАЦИИ

C. 109. Etmw2012, Викимедиа. C. 191. Университет Хасселта. C. 194. НАСА. Все остальные иллюстрации выполнил Тим Браун.

ББК 84.4  
Б52

Hayley Birch  
50 Ideas You Really Need to Know. Chemistry  
Copyright © Hayley Birch 2015

Хэйли Бёрч — британский популяризатор науки, автор научно-популярных работ по биологии, химии, экологии и синтезу науки и искусства, ее статьи публикуются в «Гардиан», «Би-би-си Фокус», «Нью сайентист» и «Мозаике». Она автор нескольких научно-популярных книг, посвященных истории науки.

## Бёрч, Хэйли

Б52 Химия. 50 идей, о которых нужно знать. — Пер. с англ. Ш. Мартыновой. — М.: Фантом Пресс, 2016 — 208 с.

Химия — это сама наша повседневность. Как работают кремниевые чипы? Как заставить природные вещества бороться с людскими болезнями? И можно ли создать искусственные мышцы? На эти и многие другие вопросы отвечает ваш проводник в мире современного химического знания — «Химия. 50 идей, о которых нужно знать». От молекул, с которых началась жизнь на нашей планете, до нанотехнологий — химия рассказывает о нашем происхождении и продолжает из года в год менять все, с чем мы соприкасаемся и от чего зависим в быту, до неузнаваемости. Эта книга в пятидесяти кратких главах обрисует для вас новейшие исследовательские методы и объяснит современные химические теории в их эволюции.

ISBN 978-5-86471-721-9

© Ш. Мартынова, перевод, 2016  
© «Фантом Пресс», оформление, издание, 2016

## Хэйли Бёрч ХИМИЯ 50 идей, о которых нужно знать

Перевод  
Шаша Мартынова  
Редактор  
Максим Немцов  
Научный редактор  
Александр Баранчиков, к. х. н.  
Корректоры  
Ирина Белякова,  
Ольга Авдюхина  
Директор издательства  
Алла Штейнман

Подписано в печать 28.09.2016.  
Формат 70х90/16. Печать офсетная.

Заказ №

Тираж 3500 экз.

Гарнитура «CharterC».

Издательство «Фантом Пресс»:

Лицензия на издательскую  
деятельность

код 221 серия ИД № 00378

от 01.11.99 г.

127015 Москва,

ул. Новодмитровская, д. 5А, 1700

Тел.: (495) 787-34-63

Электронная почта:

phantom@phantom-press.ru

Сайт: www.phantom-press.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика  
в АО «Первая Образцовая типография»,  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»  
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

По вопросам реализации обращайтесь:

ЗАО «Книжный клуб 36.6»

Офис: Москва, Бакунинская ул.,  
дом 71, строение 10

Почтовый адрес:

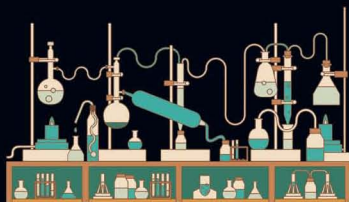
107078, Москва, а/я 245

Многоканальный телефон:

+7 (495) 926-45-44

e-mail: club366@club366.ru

www.club366.ru



Атомы  
Простые вещества  
Изотопы  
Сложные вещества  
Как это все крепится  
От фазы к фазе  
Энергия  
Химические реакции  
Равновесие  
Термодинамика  
Кислоты  
Катализаторы  
Окисление-восстановление  
Брожение  
Крекинг  
Химический синтез  
Процесс Габера  
Хиральность  
Зеленая химия  
Разделение  
Спектры  
Кристаллография  
Электролиз  
Микротехнология  
Самосборка

Лаборатория в чипе  
Вычислительная химия  
Углерод  
Вода  
Происхождение жизни  
Астрохимия  
Белки  
Действие ферментов  
Сахара  
ДНК  
Биосинтез  
Фотосинтез  
Химические посредники  
Бензин  
Пластмассы  
ХФУ  
Композиты  
Солнечные батареи  
Лекарства  
Нанотехнологии  
Графен  
Трехмерная печать  
Искусственные мышцы  
Синтетическая биология  
Топливо будущего

 phantom press		
 e-book	ISBN 978-5-86471-721-9	12+
	 9 785864 717219 > www.phantom-press.ru	