

# ФУЛЛЕРЕНЫ – СЕНСАЦИОННОЕ НАУЧНОЕ ОТКРЫТИЕ XX ВЕКА

Нина Пржиялговская

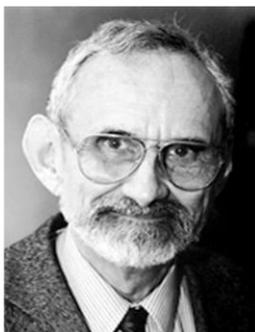
«Красота спасёт мир...»  
Ф. М. Достоевский

## Введение

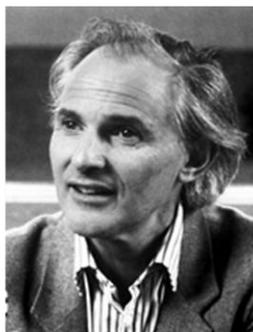
В последние годы в средствах массовой информации часто звучит термин «фуллерены». Для меня он с самого начала был химическим, так как в органической химии есть созвучные названия. Например «изопрены», «терпены», теперь появились фуллерены. Я стала собирать литературу по новым соединениям и узнала, что фуллерены – это ранее неизвестные молекулы углерода. Я также узнала, что название этим соединениям дано в честь американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера. Желая узнать, какое отношение архитектор Фуллер имеет к химии, я стала собирать литературу по этому новому направлению. Оказалось, что фуллерены по своему строению похожи на архитектурные сооружения Р. Б. Фуллера, называемые «геодезическими куполами».

Фуллерены были открыты в 1985 г. Это сенсационное событие оказало сильное влияние на всю мировую науку. Группа англо-американских ученых, а именно Гарольд Крото, Роберт Кёрл и Ричард Смолли, открыли фуллерены - новые молекулы, состоящие из одних атомов углерода, и получили в 1996 г. Нобелевскую премию по химии (рис. 1).

Robert F. Curl Jr.



Sir Harold W. Kroto



Richard E. Smalley

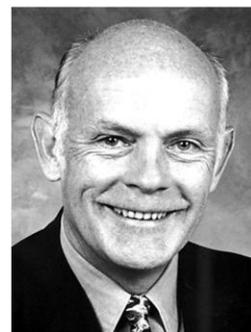


Рис. 1. Нобелевская премия по химии 1996 г. была присуждена Роберту Керлу, Гарольду Крото и Ричарду Смолли за открытие фуллеренов (1985 г.)

Необычность этого открытия состояла, во-первых, в том, что оно было связано с углеродом - одним из наиболее распространённых на земле элементом. Углерод был известен человеку уже в глубокой древности в виде угля, сажи, позже в виде алмаза, графита, а к концу XX века, когда уже стало известно, что углерод является основой жизни на земле, его многочисленные соединения были всесторонне изучены, так что в области углерода никто никаких открытий не ожидал. Но открытие произошло именно здесь, в химии углерода.

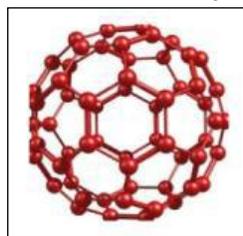


Рис. 1. Фуллерен

Сенсация открытия заключалась также в том, что строение новых углеродных соединений оказалось крайне необычным, что сильно потрясло химическое сообщество. Хорошо известно, что атом углерода в своих соединениях образует длинные углеродные цепи или плоские циклические структуры, а вот, новые молекулы углерода имели СФЕРИЧЕСКОЕ (!) строение. Атомы углерода располагались на сферической поверхности, а внутри молекулы была пустота (рис. 2).

Чудеса, в которые трудно было поверить!

Итак, открытие фуллеренов оказалось настолько фундаментальным, что затронуло практически все области научных знаний и способствовало дальнейшему развитию мировой науки. Гарольд Крото приравнял открытие фуллеренов по значимости к открытию Америки Колумбом.

### История открытия фуллеренов

Это открытие было сделано случайно, но хорошо известно, что счастливый случай падает на подготовленную почву. Учёные, открывшие новые соединения углерода, в этом смысле не являются исключением. Английский химик и астрофизик Гарольд Крото в тот период занимался изучением межзвёздной пыли. В середине 70-х годов он обнаружил в космосе соединения углерода, и у Крото появилось желание получить эти соединения в лабораторных условиях, чтобы понять их строение и механизм образования. Он знал, что необходимая для эксперимента установка имеется в лаборатории профессора Смолли в университете Райса (Хьюстон, штат Техас).

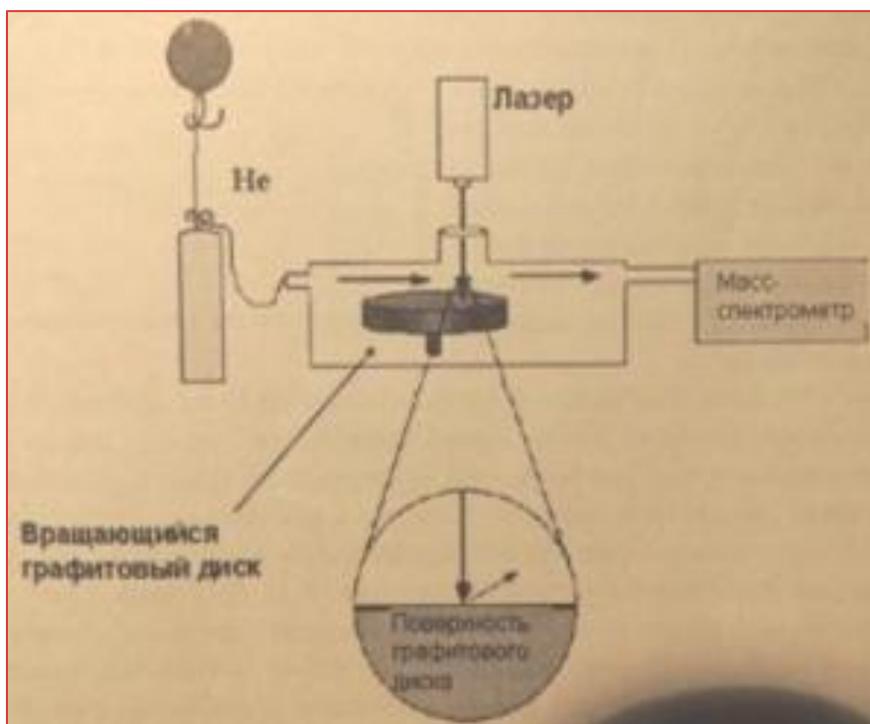
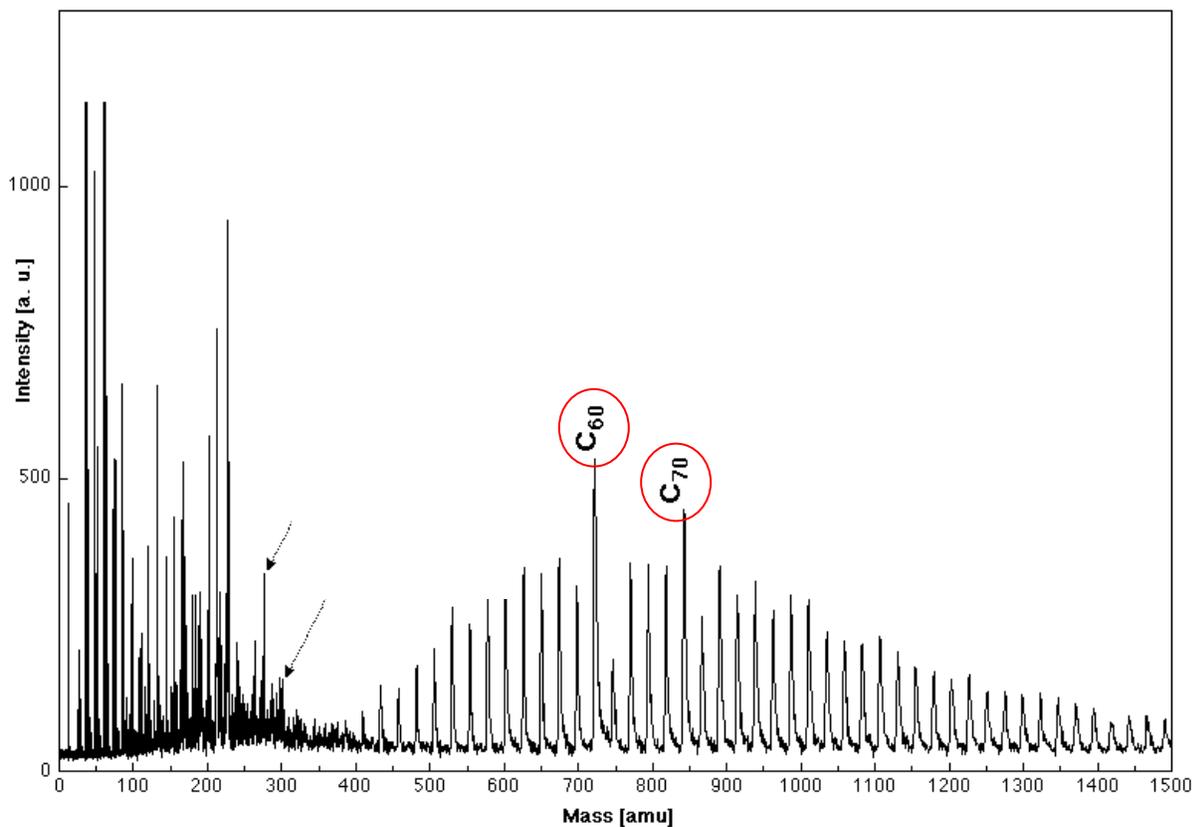


Рис. 3. Установка лазерного испарения (Ричард Смолли)

Учёные этого института Роберт Кёрли и Ричард Смолли изучали на этой установке образование кластеров (пучков, сгустков) различных элементов, в том числе и углерода. Интересы учёных совпали, (всех их интересовал углерод) и в сентябре 1985 г. Крото приехал в Хьюстон для проведения совместного эксперимента. Суть эксперимента заключалась в следующем: вращающийся диск из чистого графита облучался лазером, и в этих условиях происходило испарение графита (рис. 3). Через некоторое время образовавшийся углеродный пар направлялся инертным газом гелием в масс-спектрометр для анализа. Полученный спектр (рис. 4) показал, что в созданных условиях наряду с кластерами образуются ранее неизвестные структуры с массами 720 и 840.



**Рис. 4. Масс-спектр фуллеренов**

Эти массы отвечали молекулам, содержащим 60 и 70 атомов углерода (атомная масса углерода равна 12). Волнение охватило учёных. Что же это за молекулы, как они устроены, как такое количество атомов углерода может удерживаться вместе и создавать стабильную структуру? После совместных размышлений и многочисленных предположений учёные пришли к заключению, что открытые ими молекулы должны иметь сферическое строение. Гарольд Крото сделал предположение, что молекула  $C_{60}$  имеет строение усеченного икосаэдра (рис. 6). У этого многогранника столько же вершин, сколько атомов углерода в молекуле  $C_{60}$ . Для структуры  $C_{70}$  был предложен многогранник эллипсоидной формы. Таких молекул химики ещё не знали! Именно в этих сферических молекулах и заключалась научная сенсация сделанного открытия.

Строение усечённого икосаэдра и его название позволяет понять (рис. 6). Икосаэдр

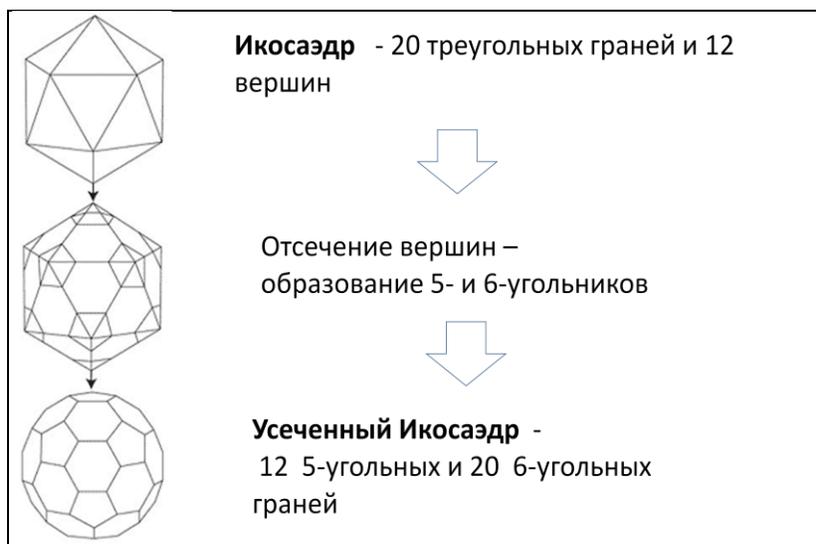


**Рис. 2. Экспо-67. Монреаль. По проекту Фуллера**

является правильным многогранником: у него все грани одинаковы (20 треугольных граней и 12 вершин). Если мысленно провести плоскости через его вершины, их как бы срезать, усечь, то на их месте появляются пятиугольные грани (их 12 по числу вершин). В ходе этого усечения треугольники превращаются в шестиугольники и теперь можно представить строение усечённого икосаэдра и молекулы углерода  $C_{60}$ .

Новорожденным соединениям надо было дать имя. Гарольд Крото вспомнил своё посещение международной выставки в Монреале в 1967 г. (рис. 5). И молекула  $C_{60}$  в виде усечённого икосаэдра вызвала у него ассоциацию с геодезическим куполом Бакминстера

Фуллера, поэтому Крото и предложил назвать молекулу  $C_{60}$  в честь архитектора «бакминстерфуллерен», а другие подобные молекулы в виде выпуклых многогранников – «фуллеренами». Его предложение было принято коллегами.



**Рис. 6.** Строение молекулы  $C_{60}$  в виде многогранника - усечённого икосаэдра

Строение фуллеренов в виде многогранников было гипотезой. Но, как сказал Г. Крото в своей Нобелевской лекции, «такая молекула настолько прекрасна, что она должна быть правильной». Через пять лет физико-химические исследования эту гипотезу подтвердили. И чудо стало реальностью: молекулы углерода могут иметь сферическое строение! В 1996 г. Роберт Кёрл, Гарольд Крото и Ричард Смолли получили Нобелевскую премию по химии за открытие фуллеренов.

### Аллотропия элемента углерода

По существующей в химии классификации фуллерены относятся к простым веществам, так как их молекулы состоят из атомов только одного элемента – углерода. Если какой-то элемент образует **НЕСКОЛЬКО** простых веществ с разными свойствами, то такое явление называют аллотропией. Таким образом, фуллерены являются ранее неизвестными аллотропными формами углерода и попадают в ряд с уже известными подобными модификациями углерода: алмаз, графит, карбин, графен. Хотя все перечисленные соединения состоят из углерода, но они сильно различаются по своим свойствам. Так, например, алмаз характеризуется исключительной твёрдостью, а графит слоистостью.

Явление аллотропии широко распространено в химии. Многие химические элементы существуют в разных аллотропных формах (рис. 7). Так, например, кислород существует в двух модификациях: в виде молекул кислорода  $O_2$  и озона  $O_3$ . Для фосфора известно 11 аллотропных форм, а вот углерод впереди всех элементов. Он образует бесчисленное количество аллотропных форм. Среди них знакомые: уголь, кокс, сажа, алмаз, графит, графен, карбин и другие и теперь в этот ряд добавляются фуллерены (число которых теоретически бесчисленно).

Фуллерены – новая форма, и в отличие от других аллотропов углерода является **МОЛЕКУЛЯРНОЙ** формой существования углерода. Нельзя сказать: «молекула алмаза», «молекула графита», а молекула фуллерена – это то, что можно и надо.

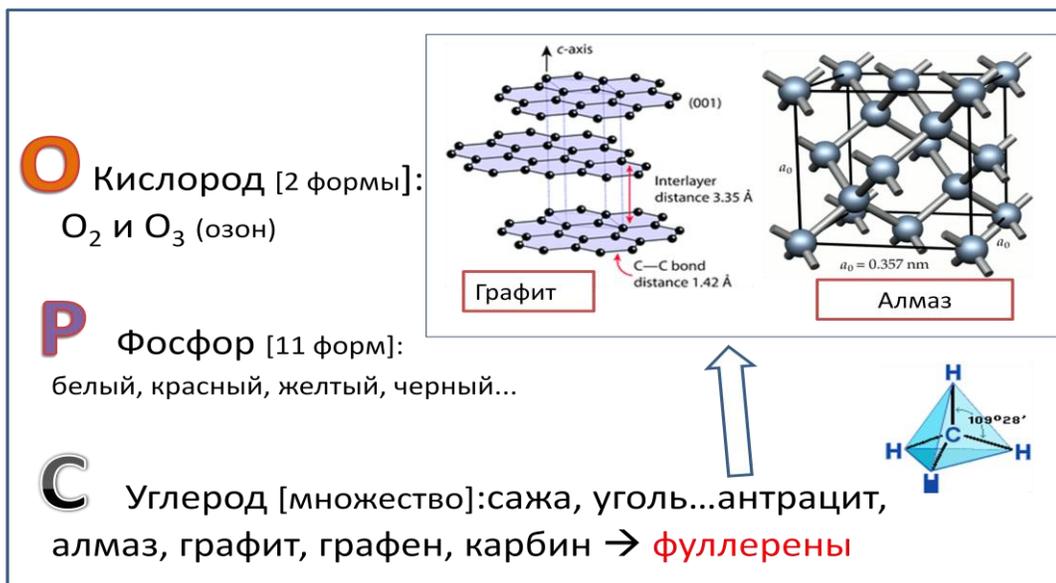


Рис. 7. Явление аллотропии в химии

### Строение атома углерода

Обилие аллотропных форм у углерода объясняется уникальным строением атома углерода (рис. 8). Этот элемент находится во 2-ом периоде, в 4-ой группе периодической системы Д.И.Менделеева. Его порядковый номер 6. Из этих данных следует, что ядро атома состоит из 6 протонов и, следовательно, это ядро имеет заряд +6. Вокруг ядра вращаются 6 электронов, из которых, согласно квантово – механическим представлениям,

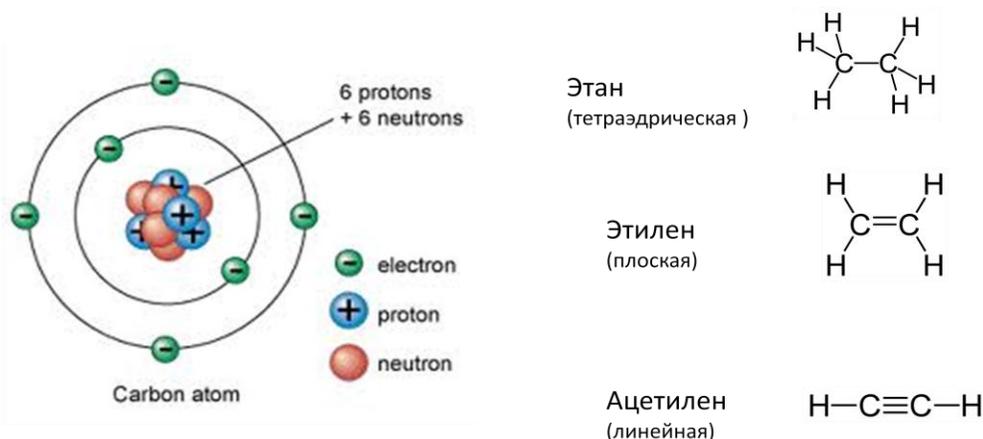


Рис. 8. Строение атома углерода

два находятся на ближайшей к ядру орбите, а остальные 4 электрона на более удаленной орбите. Свойства любого атома определяются числом и характером ВНЕШНИХ электронов. У углерода их 4. Именно эти электроны участвуют в образовании химических связей. Химическая связь – это обобщённая пара электронов (по одному то каждого атома). Химическая связь может быть простой, её называют сигма-связью, а также может быть двойной. Её называют пи-связью. Углерод 4х-валентный элемент. Уникальность атома углерода заключается в том, что он может проявлять свою 4-х валентность в разных состояниях, которые отличаются своей ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ формой.

Этих форм три: 1) тетраэдрическая; 2) плоская или тригональная и 3) линейная или диагональная. Для понимания явления аллотропии, не вдаваясь в квантово – механические

подробности, рассмотрим существующие валентные формы углерода в несколько упрощенном виде.

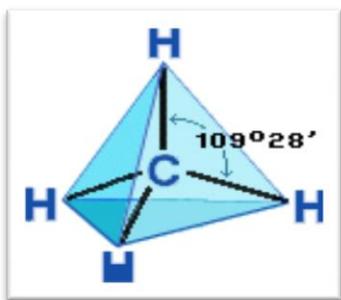


Рис. 9. Молекула метана

**ТЕТРАЭДРИЧЕСКАЯ ФОРМА.** Во многих соединениях углерод находится в этой форме. Четыре валентности атома направлены к вершинам тетраэдра. Такой атом углерода образует 4 сигма – связи. Тетраэдрическое строение имеет, например, молекула метана  $\text{CH}_4$  (рис. 9).

В вершинах тетраэдра расположены атомы водорода. Во многих органических соединениях атом углерода находится в такой тетраэдрической форме. И это говорит о том, что геометрия Фуллера, основанная на тетраэдре, подтверждается на молекулярном уровне. В таком же тетраэдрическом состоянии находится атом углерода в алмазе. Этот аллотроп состоит из атомов углерода, соединенных друг с другом только сигма-связью. Угол между соседними связями составляет  $109^\circ 28'$ . Именно такая тетраэдрическая углеродная решетка (рис.7) сообщает алмазу исключительную прочность. Огранённый алмаз превращается в драгоценный камень – бриллиант, его красота (взаимодействие со светом) также связана с тетраэдрической решеткой кристалла.

**ТРИГОНАЛЬНАЯ ИЛИ ПЛОСКАЯ ФОРМА.** Для большого числа органических соединений характерно наличие углерода в этой валентной форме - плоской или тригональной. Здесь угол между соседними связями равен  $120^\circ$ . В этом случае углерод образует три сигма - связи в плоскости, но у атома остается один электрон свободным (неспаренным). Четвертая пи - связь возникает, если такие атомы оказываются рядом. Примером может служить молекула этилена, рис. 8. Аналогичное валентное состояние имеют атомы углерода в молекуле бензола –  $\text{C}_6\text{H}_6$ . Здесь неспаренных электронов уже 6 (по одному от каждого атома углерода и они образуют над плоскостью кольца и под ним единое электронное облако). Именно из таких сочленённых ароматических колец (рис. 8) построены слои графита (пи-связи в шестичленных кольцах опущены, не показаны). Между слоями расстояние значительно больше длины химической связи. В данном случае плоское валентное состояние атома углерода хорошо объясняет слоистые свойства графита и его использование в карандашах.

Лауреаты Нобелевской премии 2010 г. по физике Андрей Гейм и Константин Новосёлов сумели получить новую аллотропную форму углерода – графен, который представляет собой одноатомный лист графита. В графене все атомы углерода находятся в тригональном или плоском состоянии, как в молекуле бензола. Такое строение хорошо объясняет слоистые свойства графита.

**ДИГОНАЛЬНАЯ ИЛИ ЛИНЕЙНАЯ ФОРМА.** Такой углерод образует только две сигма – связи, два оставшиеся электрона способны к образованию двух пи – связей. Примером может служить молекула ацетилен, рис.8. В таком же состоянии находится атом углерода в карбине. Эта аллотропная форма углерода была открыта в 1961 г. советскими химиками В. В. Коршаком и А. М. Сладковым. В карбине атомы углерода соединяются в цепочки с чередующимися одинарными и тройными связями (альфа – карбин). Карбин является полупроводниковым материалом, электропроводность которого возрастает при освещении.

Итак, мы рассмотрели три валентных формы атома углерода. Этот экскурс в теорию органической химии позволил нам понять строение углеродных аллотропов, имеющих кристаллическую форму: алмаза, графита, графена, карбина и узнать, почему эти аллотропы углерода так сильно отличаются по своим свойствам (у них разное пространственное строение, разный порядок соединения атомов углерода из-за разных валентных состояний атома углерода). Многие модификации углерода (сажа, кокс и

другие углы) имеют аморфное строение, когда атомы углерода, находящиеся в различных валентных состояниях, соединяются друг с другом хаотично, беспорядочно. Эти аллотропные состояния углерода мы рассматривать не будем. А перейдём к рассмотрению строения и свойств фуллеренов – новых аллотропных, молекулярных форм углерода.

### Строение и свойства фуллеренов

Фуллерены - это большое семейство углеродных молекул, в которых атомы углерода располагаются в вершинах выпуклых многогранников, составленных из шестиугольных и пятиугольных граней. Пятиугольники необходимы для образования криволинейной поверхности, примером которой является сфера. Из одних плоских шестиугольников криволинейную поверхность получить нельзя. Согласно теории многогранников, разработанной швейцарским математиком Леонардом Эйлером, число фуллеренов теоретически неограниченно. Простейший фуллерен (выпуклый многогранник) состоит из 20 атомов углерода ( $C_{20}$ ). Далее идут  $C_{24}$ ,  $C_{26}$ ...,  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  (рис.10) и более крупные фуллерены до ( $C_{200}$  и выше), но среди них есть молекулы более стабильные и менее стабильные. Самой устойчивой молекулой из семейства фуллеренов является

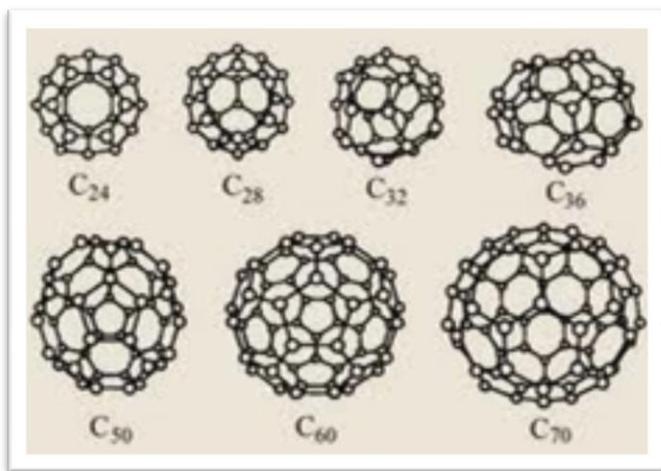


Рис. 10. Семейство фуллеренов

бакминстерфуллерен, содержащий 60 атомов углерода. Молекула  $C_{60}$  имеет форму - усечённого икосаэдра, в котором 12 пятиугольных граней и 20 шестиугольных.

Заметим, что при этом пятиугольники нигде не граничат друг с другом, то есть соблюдается правило изолированных пятиугольников. Причиной стабильности фуллерена  $C_{60}$  являются это правило, а также исключительно высокая степень симметрии усеченного икосаэдра. Вторым фуллереном, где соблюдается правило изолированных пятиугольников,

является молекула  $C_{70}$ . Но эта структура не столь симметрична, как молекула  $C_{60}$ .

Механизм образования фуллеренов пока точно не установлен. Есть предположение, что они образуются из атомов углерода, которые сначала соединяются в слой сочлененных шестичленных бензольных колец, а затем в какой-то момент происходит свертывание этого слоя в тот или иной многогранник. Для образования выпуклого многогранника необходима перестройка нескольких шестичленных колец в пятиугольники, чтобы образовалась сфера. Молекула фуллерена  $C_{60}$  имеет форму усечённого икосаэдра (рис. 11). В вершинах этого многогранника находятся атомы углерода. За сходство фуллерена  $C_{60}$  с футбольным мячом его иногда называют футболеном. Фуллерен состава  $C_{70}$  имеет вытянутую, эллипсоидную форму: 10 дополнительных атомов углерода образуют пояс из шестичленных колец, который как бы вставлен в центральную часть усеченного икосаэдра. За эту овальную форму фуллерен  $C_{70}$  иногда называют регбиболом.

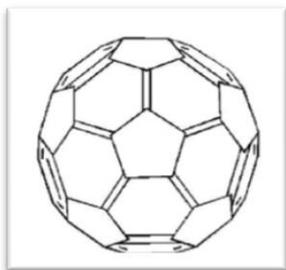


Рис. 11. Фуллерен  $C_{60}$  графите. Каждый атом углерода связан с тремя соседними тремя сигма связями и одной пи – связью. Таким образом, молекула фуллерена  $C_{60}$  имеет 30

двойных связей. Рентгеноструктурными исследованиями установлено, что молекулы фуллеренов содержат и пи- и сигма-связи. Пи-связь там, где имеется общая сторона двух шестиугольников, а сигма-связь - это общая сторона пятиугольника и шестиугольника. Фуллерены по своему строению приближаются к полиеновым органическим соединениям.

Фуллерены достаточно дорогие вещества. В условиях эксперимента нобелевских лауреатов, впервые получивших фуллерены, выход последних был крайне малым. Но дело не только в малом выходе. Очень сложным является процесс выделения индивидуальных фуллеренов из их смеси. Необыкновенный интерес к новым соединениям побудил учёных искать более эффективные методы их получения. В 1990 г. исследователи В. Кречмер и Д. Хафман разработали получение фуллеренов сжиганием графитовых электродов в электрической дуге в атмосфере гелия. Образующаяся в этих условиях сажа содержит от 3 до 8% фуллеренов. В настоящее время фуллерены получают сжиганием углеводородов (фирма Мицубиши), с выходом до 44% в образующейся саже. Стоимость одного грамма фуллерена снизилась с 10000 долл. до 10-15 долл. сегодня.

### «Фуллереновое эхо»

Открытие фуллеренов прогремело в научном мире подобно взрыву и отозвалось как эхо в различных научных сферах. Наиболее сильно этот взрыв задел химиков. Перед ними открылась заманчивая перспектива получения новых соединений из ранее неизвестного строительного блока. Новые структуры – новые свойства и применения. В конце прошлого столетия в химии начался фуллереновый бум. Молекулы фуллеренов содержат двойные связи и как все непредельные соединения они способны к реакциям присоединения. За короткий срок были получены тысячи производных фуллерена  $C_{60}$  с водородом, галогенами и различными органическими соединениями (рис. 12).

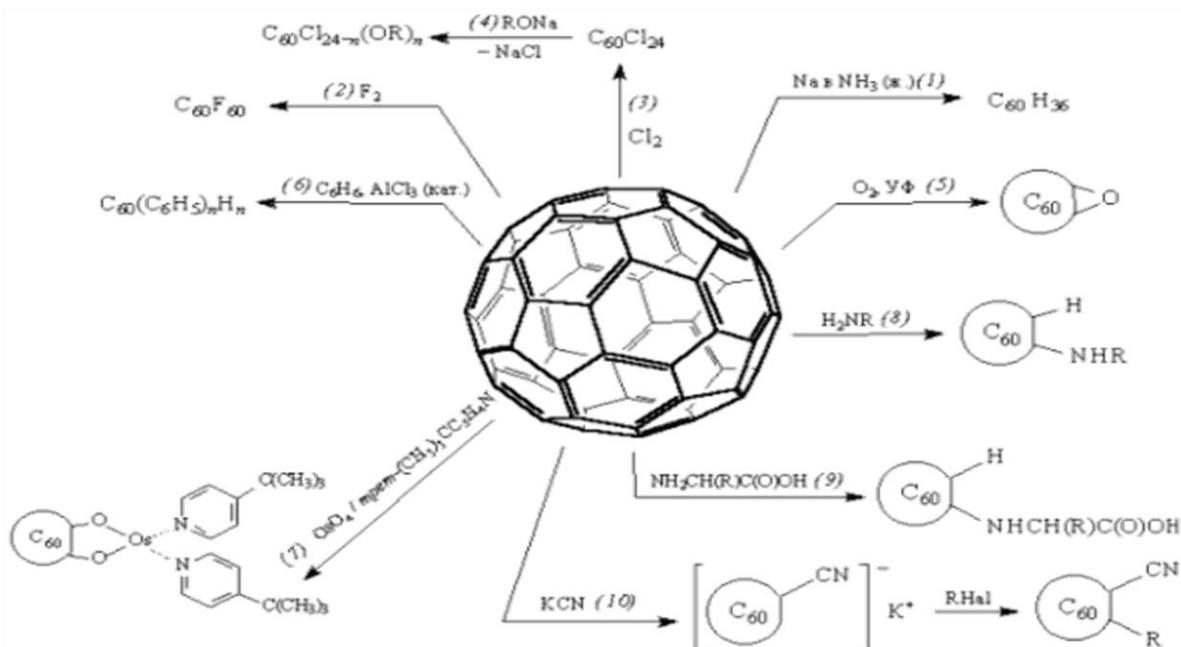


Рис. 12. Химические свойства фуллеренов

Но здесь появились свои проблемы. В фуллерене  $C_{60}$  все атомы углерода эквивалентны, то есть обладают одинаковой реакционной способностью. Поэтому в реакциях присоединения образуется большое число изомеров. И перед химиками встала проблема поиска условий для селективного протекания реакций.

И ещё одна необыкновенная возможность появилась у химиков с открытием фуллеренов. Эти сферические молекулы имеют внутри полость, в которую можно вставить другой атом или молекулу (рис. 13). Такие «фаршированные» фуллерены уже



Рис. 13. Молекула воды  
внутри фуллерена

получены с атомом бора, солями металлов и др., их в науке называют эндодральными. С ними связывают перспективу хранения ядовитых радиоактивных материалов.

У фуллеренов много интересных физических свойств. Сами они являются полупроводниками. Но если их легировать щелочными металлами, они превращаются в сверхпроводники. Необыкновенные, ранее неизвестные свойства фуллеренов открывают возможность получения новых диодов, триодов, фотоэлементов и других приборов новейшей техники.

Технологи и инженеры спешат заставить фуллерены работать на благо общества. Уже сегодня их применяют для улучшения смазочных масел. Добавление к маслу «углеродных шариков» увеличивает срок службы трущихся деталей в 5-6 раз. Фуллерены являются эффективными катализаторами в процессе синтеза искусственных алмазов из графита. Выход алмазов возрастает на 30%.



Рис. 14. Вирус СПИД

Открытие фуллеренов и их уникальное строение вызвали большой интерес у биологов и фармацевтов. Оказывается, ещё в середине прошлого столетия английские биологи Дональд Каспар и Аарон Круг (1962 г.) установили, что многие вирусы (полиомиелита, ящур и др.) обладают фуллереноподобной структурой (рис. 14). И в этом случае решение о строении вирусов было подсказано учёным геометрическими принципами архитектора Фуллера. Как видим, природа использует выпуклые многогранники, чтобы придать своим конструкциям прочность и сэкономить строительный материал.

Сегодня учёные большое внимание уделяют проблеме использования производных фуллерена в медицине и фармакологии. Обсуждается идея создания противораковых препаратов на основе «фаршированных» фуллеренов, внутри которых находятся радиоактивные изотопы. Хорошо известно, что практически любое заболевание сопровождается избыточным образованием в организме свободных радикалов. Их накопление порождает целую лавину отрицательных биологических процессов. Такое состояние называется оксидантным стрессом. Фуллерены способны с ним бороться. Гидроксилированный фуллерен  $C_{60}(OH)_{26}$ , хорошо растворимый в воде, обладает значительно более высокой антиоксидантной активностью, чем витамины «Е» и «А». В отличие от этих одноразовых антиоксидантов (одна молекула витамина уничтожает только одну радикальную частицу), фуллерены являются многоразовыми: они собирают на своей поверхности несколько радикалов, которые самоуничтожаются. Фуллерены эффективная ловушка для свободных радикалов.



Рис. 15. Обработанный  
Шунгит

Открытие фуллеренов затронуло и геологов. Все аллотропные формы углерода (уголь, сажа, алмаз, графит и другие) встречаются в природе. Фуллерены не должны быть исключением. Вскоре они были обнаружены в межзвездном пространстве (2010 г.), в вулканических газах. В 2003 г. фуллерены были найдены в минерале шунгите (рис. 15). Месторождение шунгита находится в Карелии, недалеко от деревни Шуньга. Отсюда и название породы. Камень шунгит имеет зловещий чёрный блестящий цвет. Порода состоит на 70% из кварца, и на 30% аморфного углерода. Происхождение этого минерала до конца не выяснено.

Его запасы оцениваются в 35 миллиардов тонн, а возраст в 2 миллиарда лет. Содержание фуллеренов 0,001%.

Раньше куски шунгита называли аспидными камнями. Целебные свойства этого камня были известны давно. Во времена правления Бориса Годунова боярыня Ксения Романова, мать первого русского царя Федора Михайловича Романова (1596-1645), была сослана в Заонежье. Она насильно была пострижена в монахини и стала называться Марфой. От голода и тоски Марфа заболела. Местные жители пожалели боярыню и показали ей целительный источник, который протекал через аспидные камни. Марфа вылечилась. В память о ней этот источник был назван «Царевен ключ». О целебных свойствах этого ключа знал Петр I и в 1714 г. по его приказу в Заонежье был создан первый российский курорт «Марциальные воды». Здесь лечились солдаты русской армии, сюда на лечение приезжал сам Петр. Существует легенда, что по указанию Петра I солдаты в своих вещевых мешках носили аспидные камни для обеззараживания вод, и это спасало солдат от кишечных заболеваний. В 2003 г. американские ученые подтвердили присутствие фуллеренов в шунгите и сегодня целебные свойства шунгитового источника связывают с присутствием в воде этих углеродных молекул, а сам шунгит используется в производстве фильтров для очистки воды.

Обнаружение фуллеренов в естественных минералах затронуло и такую науку как естествознание с его вечным вопросом: как возникла жизнь на Земле из неорганической материи? Возможно, изучение свойств фуллеренов позволит получить новые сведения о возникновении и эволюции Вселенной. Ведь фуллерены можно рассматривать как переходную форму от неорганической материи к органической. Появилась гипотеза, что фуллерены могли быть той матрицей, которая собирала (адсорбировала) на своей поверхности простейшие неорганические молекулы (воды, углекислого газа, аммиака и др.), которые превращались в органические соединения, например, в аминокислоты. А затем на матрице происходило их дальнейшее усложнение.

Фуллерены существуют в природе повсюду, где есть углерод и высокие энергии (вулканы, молнии), их каркас состоит из атомов углерода, который обладает высокой адсорбционной способностью. Углерод является основой жизни, так как все органические соединения являются производными углерода. Гипотеза о фуллеренах, как матрицы, на которой началась жизнь, требует экспериментального подтверждения.

Открытие фуллеренов внесло мощную струю в новое направление технологии, называемое нанотехнологией. Приставка «нано» в переводе с греческого означает «карлик». Нанотехнология – это научное направление, которое изучает свойства и закономерности поведения частиц, имеющих хотя бы в одном измерении менее 1 нанометра. (Нанометр – это одна миллиардная часть метра). Диаметр молекулы фуллерена составляет 0.7 нм. Из-за малого размера и уникальных свойств фуллерены стали визитной карточкой нанотехнологий.

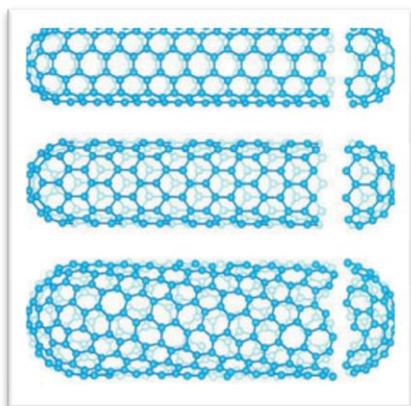


Рис. 16. Углеродные нанотрубки

В 1991 г. японский ученый Суимо Иджима открыл новые наночастицы, тесно связанные с фуллеренами. Они получили название углеродные нанотрубки. Такие трубки представляют собой графитовую плоскость, свёрнутую в виде цилиндра, закрытые с концов полусферами фуллерена  $C_{60}$  (рис. 16). Углеродные нанотрубки обладают уникальными свойствами: они являются хорошими проводниками тока и тепла. Волокна, созданные на основе нанотрубок, несмотря на их кажущуюся ажурность, обладают уникальной прочностью: в 10 раз прочнее стали и в 6 раз легче стали.

Удивительная прочность нанотрубок вернула учёных к идее создания космического лифта, ранее считавшейся неосуществимой из-за отсутствия подходящих материалов. Новая проработка этой идеи сделана Юрием Арцутановым. По его теоретическим расчётам углеродные нанотрубки являются подходящим материалом для создания троса, с помощью которого можно будет доставлять грузы на орбиту, заменив ракеты. Создание космического лифта оценивается в 7-12 млрд. долл. США. Управление НАСА уже финансирует разработки в этом направлении.

Мы видим, что открытые сравнительно недавно фуллерены и углеродные нанотрубки обладают такими свойствами, которые позволят человечеству на их основе создать новые материалы и аппараты, и сделают нашу жизнь более приятной и защищённой. Многие ещё не исследованы, и сейчас трудно предвидеть все возможные применения этих необычных материалов в практической деятельности.

Молекулы фуллеренов и углеродных трубок необыкновенно красивы. Может быть их «красота спасёт мир»? Углерод – основа жизни и вполне вероятно, что «углеродные шарики» и «трубочки», обладая невероятными свойствами, помогут людям в борьбе с болезнями и другими проблемами и жизнь на Земле станет более безопасной, комфортной и радостной и предсказание Ф. М. Достоевского: «красота спасёт мир» станет реальностью.

### **Источники**

1. Е. А. Кац. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры, М. 2009.
2. А. В. Елецкий, Б. Н. Смирнов. Фуллерены и структуры углерода. 1995.  
[www.ufn.ru/ru/articles/1995/9/a/similar.html](http://www.ufn.ru/ru/articles/1995/9/a/similar.html)
3. А. А. Лысенко, О. В. Асташкина, А. А. Петров. Фуллерен – аллотропная модификация углерода. 2006. [www.sutd.ru/publish/thvmikm/full.doc](http://www.sutd.ru/publish/thvmikm/full.doc)
4. А. Я. Борщевский, И. Н. Иоффе, Л. Н. Сидоров, С. И. Троянов, М. А. Юровская. Фуллерены. 2007. [www.nanometer.ru/2007/06/28/fullereni\\_3660.html](http://www.nanometer.ru/2007/06/28/fullereni_3660.html)
5. Фуллерены и перспективы их применение в биологии и медицине. 2012.  
[www.goldenline4u.ru/index.php](http://www.goldenline4u.ru/index.php)
6. А. Д. Орлов. Шунгит – камень чистой воды. 2010. [www.zaonego.ru/shungit.html](http://www.zaonego.ru/shungit.html)
7. Фуллерены в нанотехнологиях. [www.tecurate.ru/?p=5508](http://www.tecurate.ru/?p=5508)
8. Углеродные нанотрубки: свойства и применение. 2008  
[www.nanometer.ru/2008/04/18/karbododekaedr\\_42038.html](http://www.nanometer.ru/2008/04/18/karbododekaedr_42038.html)
9. Ю. Арцутанов – отец космического лифта. 2006  
[www.epizodsspace.no-ip.org/bibl/pervushin/artsutanov/int.html](http://www.epizodsspace.no-ip.org/bibl/pervushin/artsutanov/int.html)