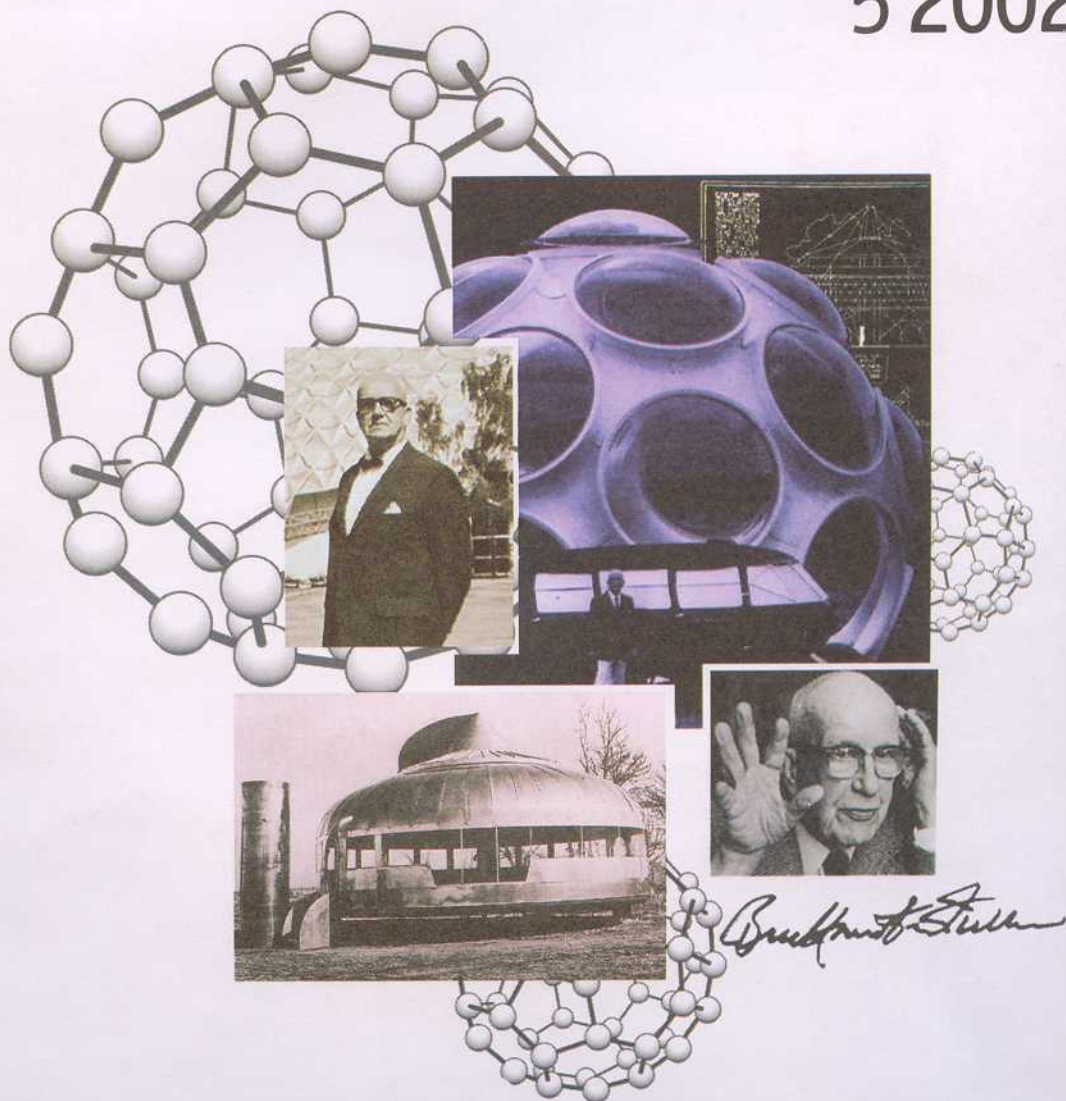


ЭНЕРГИЯ ENERGY

ЭКОНОМИКА • ТЕХНИКА • ЭКОЛОГИЯ

5'2002



Энергетическая геометрия Бакминстера Фуллера:
от молекул и вирусов до геодезических куполов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ БАКМИНСТЕРА ФУЛЛЕРА: ОТ МОЛЕКУЛ И ВИРУСОВ ДО ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КУПОЛОВ

Кандидат
физико-математических наук
Е.А. КАЦ

В предыдущей статье (Энергия, № 3, 2002) мы рассказали об истории сделанного в 1985 г. открытия молекулы из 60 атомов углерода, C_{60} , за которое его авторам, профессору Гарольду Крото, Роберту Керлу и Ричарду Смолли, в 1996 г. была присуждена Нобелевская премия по химии. Они назвали новую молекулу *бакминстерфуллерен* – в честь американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера, автора концепции *геодезических куполов* – зданий-многогранников. Впоследствии название *фуллерены* закрепилось за всем многочисленным семейством замкнутых многогранных молекул чистого углерода. В своей Нобелевской лекции Г. Крото пишет: "История открытия C_{60} не может быть правильно оценена без учета красоты формы этой молекулы, которая обусловлена ее невероятной симметрией. Другой важный аспект, создающий ауру вокруг этой молекулы, связан с ее названием *бакминстерфуллерен*, которое вызывает ассоциацию с геодезическими куполами Бакминстера Фуллера. Все это придает нашей элегантно молекуле харизму, которая очаровала ученых, привела в восторг обывателей, добавила энтузиазма молодым в их отношении к науке и, в частности, придала свежее дыхание химии". Пример открытия C_{60} лишний раз подтверждает, что любое фундаментальное исследование, выполненное на высоком уровне, может привести к серьезнейшим и весьма неожиданным практическим результатам. С этим согласен и Р. Смолли: "На самом деле открытие фуллеренов явилось результатом многолетних исследо-

ваний и разработок методов, направленных на изучение вначале атомов, затем многоатомных молекул и, наконец, агрегатов нанометровых размеров. Это было глубоко обобщенное исследование, проведение которого почти на каждом этапе было оправдано связью с нашими реальными технологическими проблемами... Хотя именно проблема установления механизма образования углеродных молекул в межзвездной среде привела Крото в Техас... связь между этим направлением исследований и открытием фуллеренов была скорее случайной, нежели причинной. Открытие C_{60} и фуллеренов в любом случае было бы сделано в течение одного-двух лет...". Скорее всего, так оно и было бы. В этом заключена существенная разница между результатами научного и художественного творчества. Ньютон и Эйнштейн обладали необычайно яркой индивидуальностью, но если бы они не появились на свет или по какой-либо причине "проскочили" мимо своих открытий, то эти открытия были бы сделаны другими людьми. Законы природы не признают индивидуальности. А вот произведения Моцарта и Ганди абсолютно индивидуальны. Сложись по-другому жизнь этих двух конкретных личностей, и человечество никогда бы не получило "Волшебную флейту" и церковь Саграда Фамилия. Это банальная истина. Соглашаясь с ней, Крото, однако, настаивает на некоей личностной, индивидуальной компоненте и в истории открытия фуллеренов: "Если бы мы не открыли C_{60} , то это бы сделали другие в течение того же года. Более того, открытие могло быть сделано и раньше. Проблема заключается в том, что когда художник пишет картину, то это произведение может быть создано только этим человеком. Другой напишет другое. Доля индивидуальности есть и в открытии C_{60} , и она заключена в его названии, то есть присвоении имени. В данном случае это доля (пусть и небольшая) моей индивидуальности, так как я предложил название бакминстерфуллерен. (Справедливости ради отметим, что по этому поводу существуют разногласия между Крото и Смолли. Прим. авт.) Если бы я не сделал это, то молекулу назвали бы *футбол* или *сокерен*. А ведь именно бакминстерфуллерен – "мощное" харизматическое имя". Это предположение Крото косвенно подтверждается, например, тем фактом, что предсказавший в 1970 г. ароматичность и стабильность молекулы C_{60} Эйджи Осава в своей статье назвал ее *сокербол* (от англ. Soccer-boll – футбольный мяч). Говорят, что в ответ на критику названия бакминстерфуллерен за то, что очень немногие знают что-либо о Бакминстере Фуллере, Крото как-то ответил: "Ну так узнают. Я рад, что наша молекула будет нести и эту просветительскую функцию".

Так кто же он, Бакминстер Фуллер? Чем знаменит человек, умерший за два года до того, как открыли и назвали его именем новое семейство углеродных молекул? Почему его имя может придать молекуле "харизму", а нобелевские лауреаты оспаривают, кто из них первым предложил это название?

Ричард Бакминстер Фуллер, или просто Баки, как называли его впоследствии тысячи людей, будущий архитектор и изобретатель, геометр и картограф, поэт и философ, один из самых оригинальных мыслителей XX столетия, родился 12 июля 1895 г. в городке Милтон в Новой Англии (штат Массачусетс) и прожил 88 лет. На протяжении нескольких поколений многие представители его семьи принадлежали к так называемым трансценденталистам (нонконформистам) Новой Англии, движению философов и писателей, сформировавшемуся в середине XIX века в штате Массачусетс. Не считая самого Бакминстера Фуллера, наиболее известной среди них можно назвать двоюродную бабушку Баки Маргарет Фуллер (1810–1850), писательницу и переводчицу, поэтессу и литературного критика, историка и общественного деятеля. Самой важной своей работой она считала биографию Гёте, над которой работала всю жизнь. Наиболее известная из ее книг – "женщина в девятнадцатом веке" (1845), художественно-социологическое исследование роли женщины в обществе, послужившее краеугольным камнем философии и социологии *феминизма*.

Самого Баки называют последним из трансценденталистов Новой Англии. Как трансценденталист он отвергал общепринятые религиозные и политические взгляды, ставя во главу угла своей философской системы неделимость окружающего мира (природы и общества) и использование эксперимента и интуиции как основных инструментов его познания. Однако философ Фуллер идет дальше своих предшественников, заключая, что спасение человечества как цивилизации возможно только на базе глубочайшего изучения и понимания (на качественном новом уровне) современной *технологии*, основу которой составляют естественные науки. Он наделяет технологию этической и эстетической функциями. Разумные технологии не должны быть источником экологических бед, грозящих гибелью человечеству, напротив, они должны стать базой для успешного решения стоящих перед ним экологических, социальных и гуманитарных проблем. Именно этой задаче Фуллер без остатка посвятил свою жизнь, будучи (как это ни удивительно) теоретиком и практиком собственного учения.

Баки был дважды исключен из Гарвардского университета и так и не сумел получить диплом о высшем образовании. Во время

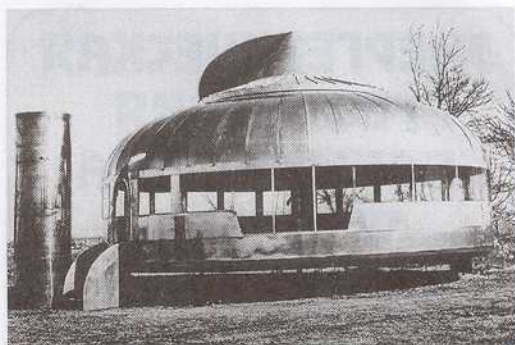


Рис. 1.
Здание Dymaxion House
(Уичито, штат Техас, 1946).

1 мировой войны служил в американском флоте командиром отряда спасательных катеров. В 1917 г. женился на Анне Хьюлетт, дочери Джеймса Монро Хьюлетта, известного художника, архитектора и изобретателя, автора модульной конструкции, в которой используются блоки из прессованного композиционного материала. После окончания войны тесть и зять на паях основывают компанию, специализирующуюся на применении этого материала при строительстве. Фуллер собственноручно руководит постройкой и вводом в эксплуатацию нескольких сотен зданий. В 1927 г. компания терпит финансовый крах. Фуллер оказывается без каких-либо средств к существованию. На это накладывается серьезный психологический кризис: в огромном Чикаго Фуллер чувствует себя абсолютно одиноким, "чужестранцем в собственной стране". В поисках выхода из кризиса тридцатидвухлетний безработный принимает решение посвятить всю оставшуюся жизнь, ни много ни мало, "разработке стратегии оптимального использования мировых ресурсов энергии и социальной эволюции современной индустрии". Другими словами – увеличению КПД нашей цивилизации. Все последующие изобретения и открытия, архитектурные сооружения, социальные и философские доктрины, а также неутомимая просветительская деятельность Фуллера были звеньями цепи, ведущей к одной цели, выстраданной и сформулированной в 1927 г.

Уже в том же 1927 г. Фуллер разрабатывает концепцию жилого дома нового типа, впоследствии названного им *Динаксион Дом*. Слово Динаксион (Dymaxion) – неологизм, сконструированный из начальных букв английских слов DYNAMIC, или Dynamism (динамичный, динамика), MAXimum (максимум) и типичного для существительных в английском языке суффикса ION. Впоследствии Фуллер использовал это слово в качестве

“личного клейма”, некой “торговой марки”, добавляя его к названиям многих своих конструкций: The Dymaxion House, The Dymaxion Car, The Dymaxion Deployment Unit, The Dymaxion Dwelling Machine. Теплоснабжение Димаксион Дома осуществлялось посредством солнечной энергии, а охлаждение – с помощью потоков воздуха, регулируемых специальной системой вентиляции. Последняя вместе с предложенной Фуллером системой фильтров контролировала уровень пыли в помещении. Округлая форма здания наряду с применением особых конструкционных материалов обеспечивала минимальный вес здания, улучшенную теплоизоляцию и прочность (включая сейсмостойкость). Димаксион Дом имел модульную конструкцию и, по мысли Фуллера, должен был подобно автомобилям серийно изготавливаться на конвейере. В 1946 г. Баки реализует этот проект и строит в Уичито (штат Техас) первый Dymaxion House (рис. 1), который – одно из немногих зданий в округе – практически без поврежденный пережил страшное торнадо 1964 г.

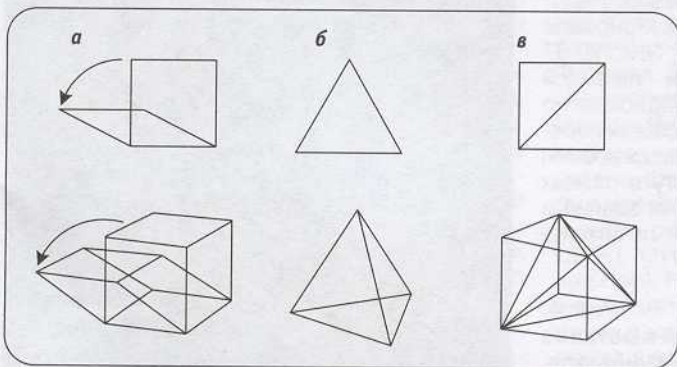
В 1928 г. Фуллер конструирует, а в 1933 г. создает прототип многоцелевого транспортного средства с реактивным двигателем и легким алюминиевым корпусом – Dymaxion Car. Баки считал, что со временем, с развитием новых технологий производства сплавов и конструкций двигателя, это будет *летающий автомо-*

биль. Пока же Dymaxion Car в соответствии с постоянной целью Баки – достижение наилучших характеристик при минимальной затрате материалов и энергии – бил рекорды на Земле: скорость до 190 км/час с двенадцатью пассажирами на борту при минимальном расходе топлива. В 1943 г. на средства промышленника Генри Кайзера Фуллер разработывает новую конструкцию Dymaxion Car с тремя отдельно управляемыми двигателями с воздушным охлаждением. Проект 1943 г., так же как и его предшественник, не был доведен до промышленного производства.

Наконец, Баки формулирует общую концепцию достижения высказанной в 1927 г. цели на языке, самом абстрактном из всех возможных – на языке математики. Предполагив, что природа являет собой векторную систему сил, отработанную за миллионы лет эволюции и обеспечивающую наилучшие характеристики (сила, прочность и т.д.) при минимальном наборе структур, основу которых составляют тетраэдрические решетки (например, тетраэдрические структуры углеродных молекул), Фуллер предлагает новую, векторную геометрию, названную им *энергетически-синергетической геометрией*. В отличие от общепринятой Декартовой системы координат, векторы которой расположены вдоль вершин куба, основной элемент векторной геометрии Фуллера – тетраэдр. Тетраэдры наряду с октаэдрами и икосаэдрами формируют структуры, наиболее прочные и максимально использующие заданное пространство (рис. 2).

Фуллер неоднократно публично заявлял, что он не считает себя ни изобретателем, ни архитектором. По его мнению, все его изобретения либо сделаны случайно, либо были всего лишь промежуточными шагами в реализации стратегии решения глобальных мировых проблем – “получения большего при меньших затратах”. В частности, его знаменитые *геодезические купола* являются лишь архитектурным следствием энергетической геометрии. Близкий друг семьи Фуллера и в последние годы жизни Баки его ассистент, И. Эпплайт, подтверждает это: “Фуллер не разрабатывал свою оригинальную геометрию для того, чтобы проектировать геодезические купола, напротив, он проектировал и строил здания из-за того, что современники не приняли его геометрии, отвергающей стандартную Декартову систему координат”.

Рис. 2. Стабильные и нестабильные формы (геометрические фигуры и тела). Большинство конструкций, изготовленных человеком, базируется на внутренне нестабильных или, как характеризует их Фуллер, “неуклюжих” формах – квадрате и кубе (а). Природа же использует в своих конструкциях треугольники и тетраэдры, которым (по Фуллеру – только им) изначально присуща внутренняя прочность и стабильность (б). Чтобы увеличить прочность изначально нестабильных конструкций, Фуллер предлагает пополнить их упрочняющими ребрами, формирующими стабильные треугольные компоненты (в).



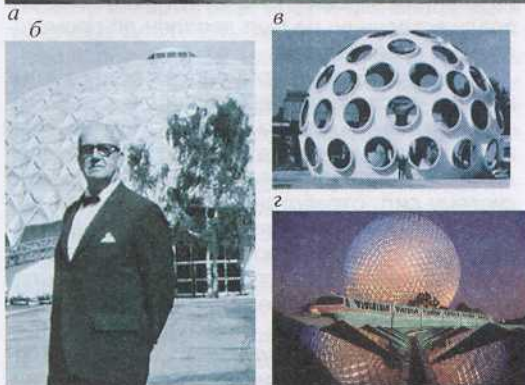
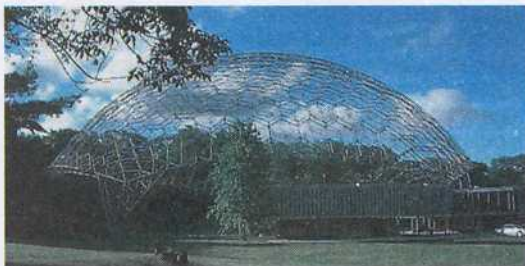


Рис. 3.
Геодезические купола
Бакминстера Фуллера:
а – штаб-квартира Международного
Общества Информации по Материалам
(Кливленд, штат Огайо);
б – Баки перед павильоном первой
выставки США в Москве в 1959 г.;
в – елe различная фигура архитектора
Джона Кутика на фоне здания,
выстроенного им по проекту
Бакминстера Фуллера “Летящий глаз”;
г – павильон “Космос – Земля”
в Диснейленде.

го ангара для исследовательского оборудования полярников на Южном полюсе до купола для экспозиции тропических растений в ботаническом саду Сант-Луиса. Среди них и известный миллионам павильон “Космос–Земля” в Диснейленде (рис. 3, г).

Дадим несколько определений и пояснений, связанных с понятием геодезического купола. *Геодезической сферой* или *геодезическим куполом* Фуллер называет многогранные структуры, поверхность которых эффективно вписывается, соответственно, в воображаемую сферу или часть сферы. Павильон в Диснейленде – пример полной геодезической сферы. Сфера выбрана Фуллером как геометрическое тело с максимальным со-

Баки запатентовал идею здания в форме геодезического купола в 1954 г. (точнее – Фуллер получил более десятка (!) патентов на эту тему). Он неоднократно реализует идею на практике. В 1958 г. строит в Лос-Анжелесе для здания компания Union Tank Car Company купол рекордных для того времени размеров (117 м в диаметре и 35 м высотой). Недалеко от Кливленда в штате Огайо в 1958 г. начинает и в 1959 г. заканчивает строительство штаб-квартиры Международного Общества Информации по Материалам (ASM International) – см. рис. 3, а. В том же 1959 г. участвует в открытии выстроенного по его проекту павильона первой американской выставки в Москве (рис. 3, б). Читатели старшего поколения должны помнить, какое значение открытие этой выставки сыграло в жизни советского общества, мучительно (и, как потом выяснилось, ненадолго) обретавшего свободу после сталинского кошмара. Наконец, в 1967 г. Фуллер открывает в Монреале павильон США на выставке ЭКСПО-67 (рис. 4), названный впоследствии “легендой американской архитектуры”, неоднократно входивший в различные списки “самых известных архитектурных сооружений всех времен и народов”. К настоящему моменту в разных уголках планеты построены тысячи зданий в форме геодезического купола – от гигантско-

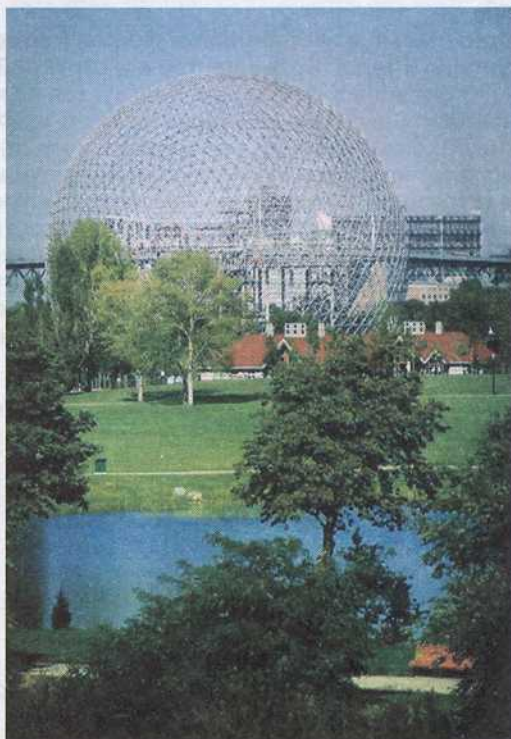


Рис. 4.
Павильон США на всемирной выставке
ЭКСПО-67 в Монреале.



отношением объема к площади поверхности. Следовательно, из всех зданий с заданным объемом именно геодезическая сфера будет иметь наименьшую площадь поверхности границы с окружающей средой, что, в свою очередь, минимизирует тепловые потери и вероятность разрушений (при ураганном ветре, например). Повышенная прочность геодезических сфер и куполов обеспечивается тем, что их гранями являются треугольники, в некоторых случаях слегка изогнутые. Для купола в форме усеченного икосаэдра, например, каждая из его шести- и пятиугольных граней разделяется дополнительными упрочняющими ребрами соответственно на шесть или пять треугольников. Введенный Фуллером параметр – частота геодезического купола – определяется количеством элементарных треугольных граней многогранной структуры. Купола с повышенным значением частоты состоят из большего числа треугольных компонент, следовательно они более прочны и эффективнее вписываются в сферу. В связи с этим, как постулировал Баки и подтвердила практика, геодезические купола – в противоположность обычным сооружениям – становятся прочнее, легче и дешевле с увеличением их размеров. Со свойственным ему бесстрашием Баки предположил, что с развитием технологий конструкционных материалов вес гигантских геодезических куполов может стать меньше веса заключенного в них воздуха. Тогда их можно будет изготавливать и собирать на специальных заводах и транспортировать к местам установки по воздуху, как воздушные шары. Звучит абсолютно фантастически... Но вот 15 марта 2001 г. на сайте "BBC News" появилось сообщение об открытии уникального ботанического сада в городе Сент-Остелл (полуостров Корнуолл, Юго-восточная Англия). Основу сада составляют четыре геодезических купола, в каждом из которых поддерживается особенный микроклимат (вспомним о минимуме поверхности и теплообмена!), соответствующий четырем различным климатическим зонам (рис. 5). Так вот, самый большой, "тропический", купол легче воздуха, заключенного внутри него!

Баки пришел к идее геодезического купола, исходя из своей генеральной доктрины повы-

Рис. 5.
Ботанический сад в Сент-Остелле
(полуостров Корнуолл,
Юговосточная Англия).

Рис. 6.
Лектор и актер – Бакминстер Фуллер.



шения КПД цивилизации и своей энергетической геометрии, абсолютно не подозревая о работах своих предшественников в этом направлении, например, Александра Белла и Вальтера Бауэрфельда. Конструирование геодезических куполов было для Баки неотъемлемой частью его философии дизайна, базирующейся на внимательном изучении и воспроизведении эффективных природных структур.

Предложенная Фуллером в начале XX века умозрительная гипотеза об использовании природой в своих конструкциях геодезических форм со временем все больше подтверждается. Мы уже приводили примеры геодезических форм живой природы: вирусов и микроорганизмов (Энергия, № 3, 2002). Вирусы со структурой икосаэдра, например, впервые описаны в 1962 г. Дональдом Каспаром и Ароном Клягом (последний был отмечен Нобелевской премией по химии в 1982 г.) в статье "Физические принципы построения регулярных вирусов". Авторы статьи выражают благодарность... Фуллеру: "Решение, найденное нами, было в значительной степени подсказано геометрическими принципами Бакминстера Фуллера".

Гипотеза Фуллера подтверждается и на уровне строения молекул. В 1940–1957 гг. был разработан метод расчета пространственного расположения атомов в молекулах ОВЭП (Отталкивание Валентных Электронных Пар). Название отражает основное положение метода: электронные пары каждого атома в молекуле принимают такое расположение в пространстве, которое сводит к ми-

нимому возможное отталкивание всех пар, окружающих ядро данного атома. Это расположение атомов соответствует наиболее устойчивому и прочному состоянию с минимальной энергией. Если все валентные электроны центрального атома в молекуле насыщены, то структуру молекулы легче всего установить, вписывая ее внутрь воображаемой сферы самым простым образом. Расчеты методом ОВЭП, подтвержденные впоследствии рентгеноструктурным экспериментом, показали, что наименьшее отталкивание четырех электронных пар соответствует расположению атомов в углах тетраэдра (просто тетраэдр, как это и заметил Фуллер, наиболее лаконичный многогранник с четырьмя вершинами, который можно вписать в сферу!). Это и есть упомянутый выше случай четырехвалентного углерода. Структура молекулы с пятью внешними атомами соответствует тригональной бипирамиде, с шестью – октаэдру, ..., с двенадцатью – икосаэдру. В любом случае грани подобных многогранников представляют собой милые сердцу Баки "прочные" треугольники. Конечно, Фуллер не подозревал о существовании фуллеренов (звучит парадоксально), но само наличие такого класса стабильных углеродных молекул лишь подтверждает интуитивное открытие им того факта, что природа на самых разных уровнях пользуется геодезическими конструкциями. По существу связь Фуллера и фуллеренов гораздо глубже, чем просто случайное совпадение внешней формы геодезического купола со структурой фуллереновых молекул, она лежит в основе метода конструирования, предложенного Баки, и отражает принцип "производства" природой устойчивых структур. Очень жаль, что Баки не дожид (до двух лет!) до открытия фуллеренов.

В 1975 и 1979 гг. Фуллер публикует двухтомную монографию "Синергетика", которую считает основным результатом всей своей жизни. В ней он обобщает метод синергетической геометрии, распространяя его на метафизические и философские категории, в частности на категорию познания. Если ранее он называл синергетикой "энергетическую геометрию природы", то теперь определяет ее как "науку о сложных системах, функционирование которых не может быть предсказано только на основе характеристик составляющих эту систему частей, взятых по отдельности". Большинство объектов природы и общества является такими системами. Взаимодействие их составляющих порой оказывается важнее самих составляющих. Следовательно и изучать такие системы надо как единое целое. Баки пытается разработать теорию познания, позволяющую "увидеть лес за деревьями", вернее, фокусируясь на "деревьях", не потерять образ "леса".

В ограниченном объеме журнальной статьи невозможно даже вкратце отразить все стороны широчайшего диапазона творческой активности Баки. Поэтому за рамками нашего повествования остались разработанная Фуллером оригинальная система картографии, множество его технических изобретений и градостроительных новаций, его литературное творчество, политические, социальные и футурологические концепции. (Наиболее любознательным читателям можно посоветовать воспользоваться неограниченными возможностями Интернета, начав свое виртуальное исследование с замечательной "странички", посвященной творчеству Бакминстера Фуллера: <http://www.thirteen.org/cgi-bin/bucky-bin/bucky-bin.cgi>)

В заключение отметим неумолимую деятельность Бакминстера Фуллера как педагога и просветителя. В 1959 г. Фуллер получает звание профессора-исследователя и в 1968 – полное профессора университета Южного Иллиойса. Однако педагогическая деятельность Баки отнюдь не ограничивается его профессорскими обязанностями. Он выступает с публичными лекциями в разных частях Земного шара, самоотверженно пропагандируя свои идеи. Баки рассматривал нашу планету как огромный космический корабль, а нас всех, ее обитателей – как пассажиров, вернее, членов экипажа этого корабля. Он без устали пытался убедить своих слушателей по всему миру, что они *обязаны* работать сообща, как единая команда, и донести до них свое понимание целей и задач такой работы.

Даже по чисто эгоистическим соображениям безумно жаль, что Бакминстер Фуллер не дожид до наших дней. Ведь доживи Баки до нашей "фуллереновой" эры, то, во-первых, его обязательно приглашали бы на конференции и симпозиумы по фуллеренам, во-вторых, ему было бы что сказать. А это значит, что у тысяч сегодняшних исследователей фуллеренов и новых материалов на их основе (а среди них, возможно, и у автора этой статьи) был бы реальный шанс послушать лекции Бакминстера Фуллера. Повторяю, безумно жаль, что такого шанса уже никогда не представится.

Лекции Баки надо было не только слушать, но и видеть (чтобы убедиться в этом, достаточно посмотреть видеозапись эпизода одной из его многочисленных лекций). Конечно, даже видеозапись не может передать ощущение живого общения с таким лектором, каким, по всей видимости, был Баки. Мы можем лишь попытаться представить себе это, воспользовавшись фотографиями (рис. 6), так как только их, к сожалению, и можно воспроизвести на журнальных страницах.