

В.И. Крюков

ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО С НАУКОЙ

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ

ИСТОКИ, ДОСТИЖЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ОПАСНОСТИ



Орёл 2011

УДК 57:001.12

**Крюков В.И. Нанотехнология: истоки, достижения, перспективы и опасности.** –Орёл: Изд-во «Автограф», 2011. –38 с. с илл.

*Брошюра содержит материал цикла ознакомительных лекций, прочтённых автором студентам, аспирантам и сотрудникам факультета биотехнологии и ветеринарной медицины ОрёлГАУ в декабре 2007 года. В брошюре кратко изложены истоки, достижения, перспективы и возможные опасности нанотехнологических разработок.*

*Брошюра может быть полезна для первого знакомства с биологическими аспектами нанотехнологических исследований. Для более детального знакомства в конце пособия приведён список книг, опубликованных в последние годы и детально раскрывающих сферу деятельности нанотехнологов.*

Рецензенты:

**Гранкин Н.Н.**, проф., д.б.н. профессор кафедры зоологии Орловского государственного университета

**Ляшук Р.Н.**, проф., д.с-х.н., заведующий кафедрой Частной зоотехнии и биотехнологии Орловского государственного аграрного университета

Учебное пособие одобрено и рекомендовано к изданию:

- кафедрой частной зоотехнии и биотехнологии (протокол № 6 от 17.04.2011);
- методической комиссией факультета биотехнологии и ветеринарной медицины (протокол № 9 от 20.09.2011);
- методическим советом ОрёлГАУ (протокол № 11 от 24.11.2011).

*В августе 2007 года Правительство РФ приняло постановление № 498 о федеральной целевой программе "Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008-2010 годы". В соответствии с этим постановлением руководство факультета БВМ поручило мне прочесть курс лекций о нанотехнологии. Лекции были прочтены, а их тексты – брошены в архив. Спустя три года они попались мне на глаза. После прочтения, я решил, что они не так уж плохи и вполне могут служить для первого знакомства студентов – будущих ветеринаров и зоотехников – с биологическими аспектами нанотехнологии. Поэтому я решил их издать. За свой счёт. А теперь ещё «вываливаю» этот опус в Интернет. Может быть кому-нибудь пригодится...*

[www.labogen.ru](http://www.labogen.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Для понятия «нанотехнология» пока не существует исчерпывающего определения. Это объясняется тем, что нанотехнология развивается на стыке физики, химии, биологии и информатики, и специалисты каждой из этих наук склонны выделять в ней, в первую очередь, свою область деятельности. Поэтому примем в качестве «рабочего» следующее определение. **Нанотехнология – это технология, основанная на возможности манипулировать отдельными атомами и молекулами с целью создания сложных объектов, структура которых может быть описана с точностью до одного атома.** Кроме того, термин «нанотехнология» используется для обозначения области науки и техники, связанной с разработкой устройств, позволяющих производить подобные манипуляции. Приставка «нано-» заимствована из слова «нанометр» –  $1 \cdot 10^{-9}$  м, т.е. одна миллиардная доля метра (или одна миллионная часть миллиметра). Эта величина равна нескольким межатомным расстояниям.

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Где и для чего могут быть использованы нанотехнологии? На базе полученных результатов в настоящее время в ней можно выделить следующие 4 области развития и применения нанотехнологий.

1) Нанозлектроника и компьютерные технологии. В этой области, в свою очередь, можно выделить 4 направления:

а) создание сверхмощных наноструктурных процессоров со сниженным энергопотреблением;

б) создание систем связи с повышенными частотами прохождения сигналов и более эффективным использованием оптического спектра;

в) создание сверхминиатюрных запоминающих устройств огромных ёмкостей (на уровне многих терабайт);

г) создание интегрированных систем нанодатчиков (сенсоров), способных собирать, перерабатывать и передавать большие количества данных при минимальных размерах, массе и энергопотреблении.

2) Нанотехнологии в биологии, медицине и ветеринарии. Возможные применения наносистем в этой области таковы:

а) быстрое, более эффективное установление первичной структуры генома, обеспечивающее революцию в диагностике и терапии наследственных заболеваний;

б) новые рецептуры и технологии доставки лекарственных препаратов и даже генов к органам;

в) создание более стойких и устойчивых к отторжению искусственных тканей и органов;

г) создание принципиально новых слуховых и зрительных аппаратов;

д) создание системы датчиков (биосенсоров), которые будут выявлять на ранних стадиях возникающие заболевания в организме, что позволит переориентировать стратегию медицинской помощи с лечения заболеваний на их раннее обнаружение и предотвращение.

3) Мехатроника, т.е. производство и изготовление наномашин или нанодвигателей – механизмов, размеры которых не превышают размеры биологических клеток, а в идеале – намного меньших. Отдельная область нанотехнологии изучает возможность создания нанороботов. Нанороботы – это устройства размером в единицы и десятки нанометров, которые смогут самостоятельно манипулировать отдельными атомами. В будущем нанороботы смогут: 1) самовоспроизводиться, 2) создавать из произвольного материала любые необходимые материалы (и даже предметы заданной формы), 3) перемещаться и выполнять определённую работу внутри человеческого тела. Нанороботы смогут удалять из клеток шлаки и восстанавливать поврежденные внутриклеточные органоиды и ДНК.

4) Новые конструкционные и функциональные материалы. В этой области производства наносистемы позволяют:

а) получать наноструктурированные металлические материалы, керамику и полимеры с точными формами изделий без дополнительной их обработки;

б) создавать сверхпрочные материалы и металлопокрытия в наноразмерных слоях;

в) получать материалы для применения в электронике, компьютерных и телекоммуникационных технологиях;

г) использовать кристаллические материалы как носители катализаторов с хорошо структурированными размерами пор в диапазоне 1 нм;

д) разрабатывать упорядоченные мезопористые материалы с размерами пор в диапазоне 10-100 нм, позволяющие применять такие системы для удаления ультрадисперсных загрязнений.

## ИСТОКИ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Чуть более 100 лет назад знаменитый физик Макс Планк создал квантовую теорию, которая позволила предположить, что эта сфера атомарных структур подчиняется новым, удивительным законам. Се-

годня учёные свободно оперируют этими законами, манипулируя наноструктурами.

В 1959 году, американский физик Ричард Фейнман на ежегодном собрании Американского физического общества прочитал свою знаменитую лекцию, названную им так: «Там, внизу, ещё много места». На ней он заявил: «Пока мы вынуждены пользоваться атомарными структурами, которые предлагает нам природа. Но в принципе физик мог бы синтезировать любое вещество по заданной химической формуле». Эта знаменитая лекция считается началом покорения мира молекул и атомов.

Само понятие «**нанотехники**» было введено в 1974 году японским профессором Норие Танигучи (Norio Taniguchi).

Первые средства для нанотехнологии были изобретены в 1981 г в швейцарских лабораториях фирмы IBM. Сотрудники фирмы IBM Герд Биннинг и Генрих Рорер изобрели электронный сканирующий туннельный микроскоп (рис. 2 и 3). За это изобретение им была присуждена Нобелевская премия. Принцип действия туннельного микроскопа состоит в следующем. При движении тонкой иглы (нанозонда) на очень малом расстоянии над поверхностью, проводящей электричество, из-за эффекта квантового туннелирования электронов возникает ток утечки. Поддерживая этот ток на постоянном уровне путем приближения иглы к поверхности или удаления от нее можно получить профиль поверхности с атомарным разрешением. Если же на иглу подать большее напряжение, чем нужно для измерения профиля, то при определенных условиях атом может оторваться от по-



Рис. 1. Профессор Норие Танигучи (1912-1999).

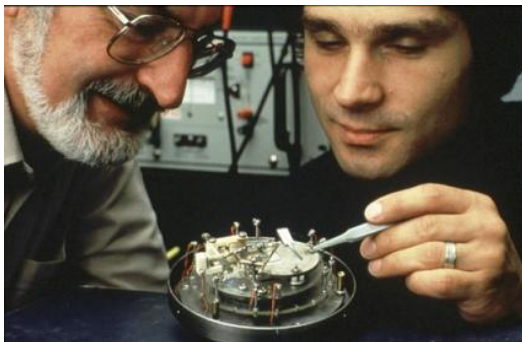


Рис. 2 Нобелевские лауреаты Хейнрих Рохер (Heinrich Rohrer, слева) и Герд Биннинг (справа) в исследовательской лаборатории IBM (Цюрих) с созданным ими в 1981 г. сканирующим туннельным микроскопом первого поколения

верхности и присоединиться к игле. Это позволяет перенести его в другое место и опустить обратно на поверхность. В дальнейшем был создан ряд устройств со сходными принципами работы. Например, в

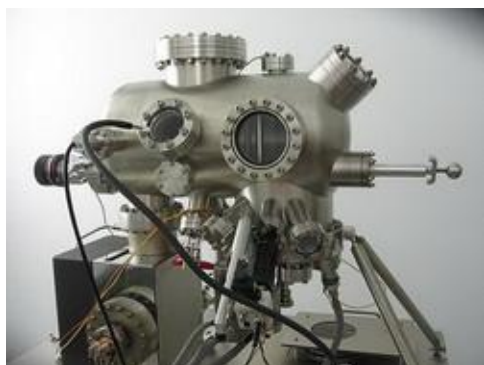


Рис. 3. Одна из современных моделей сканирующего туннельного микроскопа.

1986 году был создан атомный силовой микроскоп. Слово «микроскоп» в названиях описанных инструментов может вводить в заблуждение. Подчеркнём, что нанозонды дают возможность не только увидеть атомы, но и манипулировать ими. В настоящее время создан специальный прибор, сочетая принципы атомно-силовой микроскопии и магниторезонансной визу-

ализации, позволяет исследовать с нанометровым разрешением структуру образца на глубине до 100 нанометров от поверхности.

## ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ В ФИЗИКЕ

В начале 80-х годов специалисты фирмы IBM сумели с помощью туннельного микроскопа выложить буквы «IBM» высотой в 6-8 атомов (рис. 4а). Позже они выложили надпись из 112 молекул монооксида углерода (рис. 4б). 250 миллионов букв такого размера (это 300 книг в 300 страниц каждая) – могут быть написаны на человеческом волосе.

В 1989 году учёный Дон Айглер (Don Eigler), также проводивший свои эксперименты в лабораториях IBM, впервые смог не только переместить атомы при помощи сканирующего микроскопа, но и научился делать это в заданных направлениях и на заданные расстояния. Сегодня при помощи его установки свободно можно перемещать наночастицы, управляя процессом с компьютера.

В Северо-Западном университете США создана установка, позволяющая производить в наномасштабе 55 тыс. структур на молекулярном уровне с одинаковым паттерном («рисунком») одновременно. С реализацией на практике нового метода Dip-Pen Nanolithography (DPN) появилась возможность промышленного освоения самых передовых нанотехнологий. Для демонстрации возможностей нового метода ученые растиражировали портрет изобретателя паровоза Томаса



Джефферсона с пятицентовой монеты, создав его с помощью 55 тысяч отдельных молекул, затратив на это всего 30 минут.

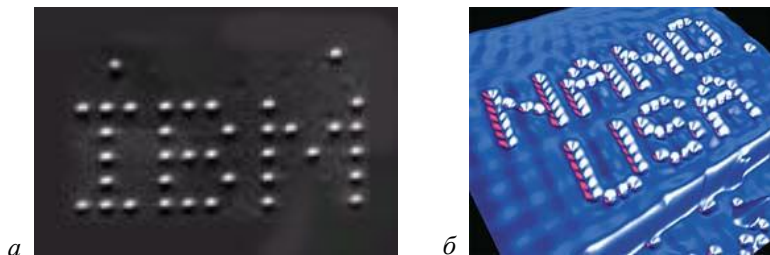


Рис. 4. Надписи, выложенные отдельными атомами с помощью туннельного микроскопа.

Физики научились на основе так называемых квантовых точек изготавливать лазеры с рекордно низким значением порогового тока, и, следовательно, с высоким коэффициентом полезного действия. Подобный лазер с двойной гетероструктурой присутствует теперь фактически в каждом персональном компьютере как ключевой элемент системы считывания информации CD-приводов. С помощью нанотехнологии созданы солнечные элементы, которые используются для космических исследований. Так, последние 15 лет своей жизни станция «Мир» провела, питаясь энергией от таких солнечных элементов.

Выше было отмечено, что одной из задач нанотехнологии является создание нанороботов. Большие успехи в создании микроминиатюрных роботов были достигнуты в японском Университете Токуо. Японскому исследователю Казуши Ишияма (Kazushi Ishiyama) удалось разработать радиоуправляемое устройство размером меньше, чем размер рисового зернышка (рис. 5). Этот робот имеет цилиндрические магниты длиной 8 мм и диаметром менее 1 мм. Роботом можно управлять с помощью электромагнитного поля, под воздействием которого магниты заставляют его вкручиваться туда, куда ему приказывает оператор. К. Ишияма разработал два прототипа робота – для жидкой и для плотной среды. Результаты первых испытаний обнадеживают: робот для жидкости успешно передвигался в емкости, заполненной силиконом, а «плотный» робот оказался в состоянии проходить сквозь двухсантиметровый бифштекс. Одно из своих устройств К. Ишияма оснастил металлическим шипом. Нагреваясь, шип будет в состоянии разрушать отдельные раковые клетки. При желании такие устройства можно будет вводить в вены с помощью обычной медицинской иглы. А если удастся сконструировать еще более миниатюрные устройства, они смогут проникать и в самые мелкие сосуды, находящиеся, например, в головном мозге.

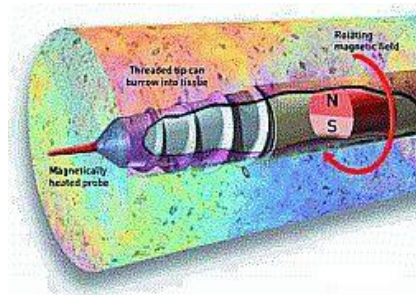


Рис. 5. Профессор Казуши Ишияма и схема миниатюрного двигателя, созданного им в японском университете Тохоку .

В последние несколько десятилетий происходило бурное развитие и интенсивная миниатюаризация компьютерной техники. Однако современные кремниевые чипы могут, при всевозможных технических ухищрениях, уменьшаться ещё примерно до 2012 года. Но при ширине дорожки в 40-50 нанометров наступит конец этому развитию. За этим пределом наступает квантовомеханическая помеха: электроны пробираются через разделительные слои в транзисторах, что равнозначно короткому замыканию. Дальнейшее уменьшение размеров возможно лишь при создании наночипов. В них вместо кремния используются различные углеродные соединения размером несколько нанометров. Для хранения одного бита информации теоретически нужна всего одна молекула. Изготовленный таким образом накопитель на жёстком диске мог бы во много раз превзойти по ёмкости сегодняшние аналоги. Уже есть лабораторные образцы первых молекулярных электронных устройств. Например, учёные калифорнийского университета Беркли смогли зажать нанокристалл модифицированного углерода  $C_{60}$  (фуллерена) между золотыми электродами и превратить эту наноконструкцию в одноэлектронный транзистор. Физикам уже известен ряд других органических молекулярных групп, которые могут функционировать как выпрямитель, проводящая шина или запоминающее устройство. К примеру, в 1999 году американские ученые, используя асимметричные молекулы с бензольными кольцами, получили молекулярный транзистор (рис. 6).





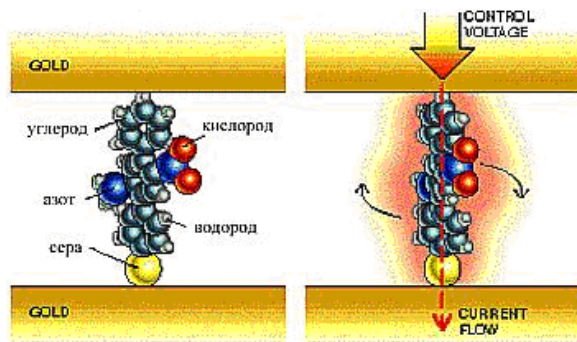


Рис. 6. Молекулярный транзистор на основе асимметричной молекулы с бензольными кольцами.

Столь же существенный прорыв ожидается в создании запоминающих устройств (ЗУ). В них вся информация кодируется в виде нулей и единиц. Учёные из IBM под руководством Герда Биннига (Gerd Binnig) изобрели нано-ЗУ, который они назвали миллипедом. Миллипед представляет собой растр из 1024 зондов атомного силового микроскопа. Если нужно записать «1», их кончики продавливают отверстие в мягком слое полимера. Для считывания битов миллипед проверяет поверхность на наличие отверстий в полимерном слое. Если рычажок попадает в отверстие, его температура, а вместе с тем и сопротивление, изменяются, а его уже можно измерить. Таким способом можно получить плотность записи до 80 Гб на квадратный сантиметр (сравните с максимальной сегодня (в 2008 г) ёмкостью ЗУ 8 Гб/кв. см). Через 3 года IBM планирует изготовить миллипед с 4000 зондов, который можно будет применять в новом поколении портативной техники. По мнению Биннига, в перспективе можно создать миллипед с миллионом зондов.

Недавно корпорация Iomega получила патент на способ записи информации на внешнем накопителе информации (компакт-диске), названный NG-DVD (Nano-Grating DVD, т.е. наноячеистый DVD). Эта технология создаёт на носителе нанорешетку, каждая ячейка которой позволяет одновременно сохранять разнородную информацию, используя 1) отражающую способность, 2) поляризацию, 3) фазу и 4) ориентацию отражающей поверхности одной ячейки. Такая нанотехнология позволяет сохранять в 100 раз больше информации, чем существующие DVD и считывать её в 30 раз быстрее. При этом затраты на производство новых дисков не превышают затрат на изготовление обычных DVD.

Одной из проблем проводной техники является ограничение на скорость передачи сигнала. Это ограничение можно преодолеть, если использовать беспроводную связи элементов. Используя наномангниты, можно создать радиопередатчики размером с бактерию. Сейчас учёные проводят эксперименты с магнитами от 50 до 80 нм в поперечнике. Под воздействием электрического тока поле магнита начинает осциллировать, что может быть использовано для передачи радиосигнала. Эти радиопередатчики позволят создать беспроводные микросхемы. Американские физики работают над созданием приемопередатчиков радиодиапазона, с помощью которых будет возможна беспроводная передача информации как между микросхемами, так и внутри микросхемы.

## **ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ В ХИМИИ.**

Химики активно интересуются наноинженерией, т.к. если создавать молекулярные структуры в наномасштабах, то можно получить совершенно новые материалы. Например, обычное золото при комнатной температуре не является катализатором химических реакций, а частички золота размером от 3 до 5 нанометров – отличный катализатор. Одна японская фирма использовала этот эффект для изготовления оригинального продукта. Её «пожиратель запаха» с помощью наночастиц золота разлагает молекулы туалетных испарений.

Нанокатализаторы позволяют предотвратить потери и повысить эффективность многих технологических процессов. Почти 20% сырой нефти остаются не переработанными по причине несовершенной технологии очистки. Сейчас ведутся работы по созданию специальных керамических цилиндров, пронизанных нанопорами, способных удерживать только одну молекулу. Если пропустить сырую нефть через такой катализатор, то ни одна молекулярная цепочка не уйдёт от очистки, и эффективность крекинга достигнет 100%.

С помощью нанотехнологий получен нанопорошок из йодида серы, который применяют для изготовления чипов Athlon от AMD или Intel Pentium. При химико-механической обработке кремниевая плата, из которой будут вырезаны процессоры, перед каждым этапом наращивания полируется таким порошком.

Сегодня благодаря нанотехнологиям, не только усовершенствованы «классические» технологии получения нужных веществ, но изобретены несколько принципиально новых микроэлементов и структур. К ним следует отнести фуллерены, нанотрубки, а также квантовые точки.

До открытия фуллеренов учёным были известны только три формы кристаллических решёток углерода – графита, алмаза и карбина. Новой формой кристаллической решётки углерода является фуллерен. Фуллерены были экспериментально открыты в середине 80-х годов. Сферическая молекула фуллерена (например,  $C_{60}$ , рис. 7) содержит фрагменты с пятикратной симметрией (пентагоны), которые «запрещены» природой для неорганических соединений. Поэтому следует признать, что молекула фуллерена является органической молекулой, а кристалл, образованный такими молекулами (фуллерит) – это молекулярный кристалл, являющийся связующим звеном между органическим и неорганическим веществом.



Рис. 7. Молекула фуллерена  $C_{60}$ .

Фуллерены способны существовать не только в виде неких гигантских молекул-мячей (бакиболов), но при определенных условиях способны сворачиваться в цилиндры, состоящие из нескольких тысяч атомов углерода. Такие цилиндры называют нанотрубками. Главная особенность этих молекул – это их каркасная форма: они выглядят как замкнутые, пустые внутри «оболочки» (рис. 8). Трубки состоят из концентрических графитовых оболочек, каждая из которых свёрнута в цилиндр.

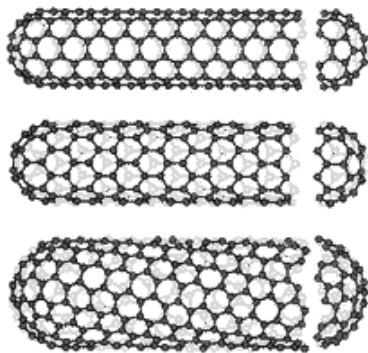


Рис. 8. Нанотрубки различных диаметров.

получения, нанотрубки могут демонстрировать как *n*-тип проводимости, так и *p*-тип. Следовательно, их можно будет использовать для изготовления сверхпрочных и сверхминиатюрных переключающих элементов!

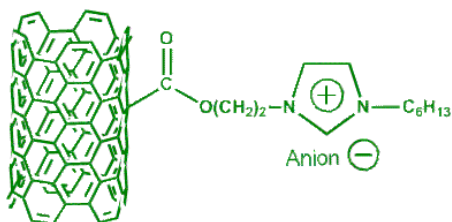
Трубки состоят из концентрических графитовых оболочек, каждая из которых свёрнута в цилиндр.

Нанотрубки имеют огромные преимущества перед большинством известных на сегодняшний день материалов: по прочности они превосходят сталь, весят существенно меньше любого пластика, великолепно проводят электрический ток и тепло. В зависимости от метода

Нанотехнологи из Университета Техаса создали прозрачные углеродные листы из нанотрубок, которые прочнее стальных листов такого же веса. Они могут применяться для производства подсветки дисплеев, высокочувствительных датчиков, искусственных мышечных волокон и широкополосных источников поляризованного света, способных включаться за 100 микросекунд.

Соотношение прочности материала и его веса важно для большинства применений, особенно в космической и аэрокосмической областях. Этот показатель для листов из нанотрубок уже превышает аналогичный для самой прочной стали, листов лавсана и каптона, используемых в производстве сверхлегких воздушных транспортных средств и предполагаемых для солнечных парусов космических аппаратов. Листы из нанотрубок можно сделать настолько тонкими, что квадратный километр солнечного паруса будет весит всего 30 килограммов.

Листы из нанотрубок сочетают в себе прозрачность и высокую электропроводность, они очень гибкие и предоставляют огромную площадь поверхности на единицу массы, что позволило ученым продемонстрировать их использование в качестве электродов для ярких дисплейных светодиодов. Нанотрубчатые листы хорошо поглощают микроволновое излучение. Это приводит к локальному нагреву. Ученые покрыли плексиглас плёнкой из нано-трубчатых листов, а затем использовали промышленную микроволновую печь для сварки этих листов плексигласа, чтобы изготовить окно. Сварка не повлияла ни на электропроводность ни на прозрачность нанотрубчатого покрытия плексигласа. Это позволяет использовать такие листы в качестве прозрачных нагревательных элементов и – одновременно – антенн в автомобильных стеклах.



Anion = Cl, Br, CH<sub>3</sub>COO, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> -- водорастворимость  
 Anion = ClO<sub>4</sub>, BF<sub>4</sub>, PF<sub>6</sub>, (CF<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)N -- органорастворимость

Рис. 9. Модифицирование растворимости углеродной нанотрубки в зависимости от аниона и свойств наноматериала.

Китайские нанотехнологи разработали способ «переключения» растворимости углеродных нанотрубок. Исследователи модифицировали углеродные нанотрубки фрагментами различных структурных

элементов (рис. 9), характерных для ионных жидкостей, и обнаружили, что переход от «водорастворимости» к «органо-растворимости» может достигаться просто заменой аниона. Переключение от водо- к органо-растворимости полностью обратимо и не требует дальнейших химических превращений. Управление растворимостью углеродных нанотрубок в воде и органических растворителях может быть использовано как для тонкой очистки углеродных нанотрубок, так и для их дальнейшей химической модификации.

Это открывает новые возможности для практического применения углеродных нанотрубок в сенсорах и усилителях аналитического сигнала в биологических и медицинских исследованиях. Положительный заряд наноконструкции обеспечивает прочное взаимодействие с отрицательно заряженной мембраной клетки. Поэтому несущие положительный заряд углеродные нанотрубки могут быть применены в клинических тестах на клеточном уровне.

Введение наночастиц в полимерные вещества в небольших концентрациях позволяет сильно улучшить их свойства. Можно уменьшить проницаемость материала для газов, таких как водород, кислород, углекислый газ. Можно намного увеличить прочность материала при совершенно незначительном увеличении его веса. Но в этом вопросе есть проблемы. В то время как добавление 1% (по весу) примесей из наночастиц ведет к огромному изменению свойств материала, добавление 2-3% примесей уже почти не дает заметного эффекта. Кроме того, добавление примесей из наночастиц влияет на текучесть полимерных материалов, что может привести к трудностям при их производстве. Наука, изучающая возможности использования сведений о строении и функционировании живых организмов в технике называется бионикой. Интересный пример синтеза бионики и нанотехнологии дают диатомовые водоросли. Остатки скелетов этих морских водорослей (рис. 10) образуют целые залежи диатомита (инфузорной земли).

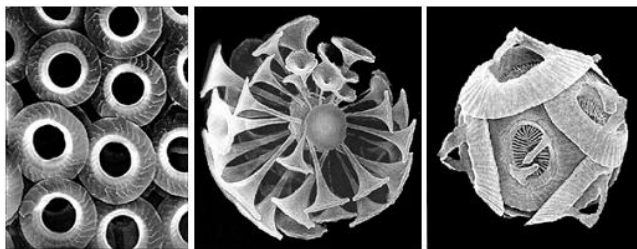


Рис. 10. Скелеты диатомовых водорослей.

Диатомит прославил и обогатил А.Б. Нобеля (1833-1896), который пытался превратить чрезвычайно взрывчатый тринитроглицерин в более безопасное, но столь же мощное взрывчатое вещество. Изобретенный Нобелем динамит – это диатомит, пропитанный тринитроглицерином. Сегодня диатомит используется как адсорбент и фильтрующая среда в текстильной, нефтехимической, пищевой отраслях промышленности, в производстве антибиотиков, бумаги и различных пластмасс.

Учёные научились получать искусственные, «стандартизованные» материалы с кремнеземными структурами строго определенной формы. Они используются как уникальные фильтры, катализаторы и сорбенты с заданным размером пор, микрокапсулы для лекарств, упрочняющие наполнители композитов, дифракционные решетки оптических датчиков.

Отечественная компания «Nanotechnology News Network» недавно представила в России новинку – самоочищающиеся нанопокрyтия. Достаточно опрыскать стекло автомобиля специальным раствором с наночастицами диоксида кремния, и на протяжении 50 тыс. км к нему не будет приставать грязь и вода. На стекле остается прозрачный сверхтонкий слой, на котором воде просто не за что зацепиться, и она скатывается вместе с грязью. В первую очередь новинкой заинтересовались владельцы небоскребов – на мытье фасадов этих зданий уходят огромные деньги. Существуют такие составы для покрытия керамики, камня, дерева и даже одежды.

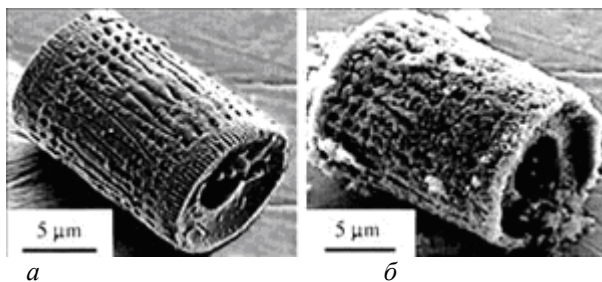


Рис. 11. Структура, созданная из анатаза  $\text{TiO}_2$  (а), повторяет скелет диатомовой водоросли (б).

Большие возможности открывает создание структур, повторяющих трехмерный кремнеземный скелет, но имеющих иной химический состав. Химики-неорганики уже провели первые эксперименты в этом направлении. Сначала  $\text{SiO}_2$  заменили на  $\text{MgO}$ . Более впечатляющим успехом явилось создание трехмерной структуры, повторяющей ске-



лет водоросли, но состоящей из анатаза – одной из форм  $TiO_2$ . Насколько полно при этом воспроизводится форма микрообразования, можно судить по приведенному рисунку (рис. 11). Диоксид титана – уникальное вещество, обладающее свойствами фотокатализатора. Развита поверхность диоксида титана, его микропористая структура значительно усиливают каталитическое действие. В настоящее время стоит задача – для нужд нанотехнологии классифицировать диатомовые водоросли по размерам и форме отдельных частей их скелетов: по геометрии пор, створок, ребер, рогов, шипов, сплошных и полых колечек, трубковидных выростов и пр.

## **ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ В БИОЛОГИИ**

Среди всего разнообразия биологических соединений – с точки зрения удобства наносборки – выделяют нуклеиновые кислоты, потому что у них есть несколько характерных особенностей.

1) Короткие двухцепочечные молекулы ДНК имеют довольно высокую жесткость, а потому их удобно использовать в качестве «строительных блоков». В то же время одноцепочечная нуклеиновая кислота сохраняет гибкость и, кроме того, обладает способностью узнавать комплементарную ей цепочку. Две такие цепочки легко «слипаются» вместе благодаря образованию водородных связей. Если у двухцепочечных молекул есть на концах липкие концы, то можно присоединять другие цепочки и формировать места разветвления. А это позволяет создавать плоские молекулярные решетки и сложные пространственные структуры. Невысокая жесткость наноструктур типа плоской решетки имеет и привлекательную сторону: такую решетку, при правильном подборе последовательности нуклеотидов, легко сгибать. В 1991 году была получена наноструктура, имеющую форму куба с ребрами из молекул ДНК. Можно создавать и другие объемные конструкции, например сцепленные октаэдры и додекаэдры. В 1997 году американский нанотехнолог Дональд Бергстрем использовал для наноконструирования синтетические молекулы, состоящие из двух цепочек нуклеотидов, концы которых сшиты между собой жестким углеводородным мостиком. Из таких деталей можно было создавать конструкции в виде звезд с несколькими лучами.

2) Свойства двумерных и трехмерных структур из нуклеиновых кислот легко регулировать, используя разные растворители в которых происходит наносборка. Средства современной биотехнологии позволяют производить в промышленных масштабах одноцепочечные и двухцепочечные молекулы нуклеиновых кислот с заранее заданными

последовательностями азотистых оснований, поэтому недостатка в «строительных блоках» для наносборки нет.

Современная молекулярная биотехнология позволяет создавать в промышленных масштабах одноцепочечные и двухцепочечные молекулы нуклеиновых кислот с заранее заданными последовательностями азотистых оснований. Поэтому недостатка в «строительных блоках» для наноконструирования нет. Существуют две стратегии создания наноконструкций. Независимо от того, какая из них выбрана, структуре материалов на основе нуклеиновых кислот можно контролировать с молекулярной точностью.

Первая стратегия конструирования – «шаг за шагом» была теоретически обоснована в 1982 году в работе американского химика Неда Зимана *фото*. Этот подход основан на пошаговой модификации исходной молекулы двухцепочечной нуклеиновой кислоты или синтетического полинуклеотида. Первый шаг – получение фрагментов ДНК с «липкими» одноцепочечными концами. Это можно сделать биохимическими методами или путем прямого химического синтеза. Когда липкие концы разных фрагментов ДНК склеиваются друг с другом, образуется структура с небольшими дефектами – разрывами в сахарофосфатных цепях. Разрывы сшивает специальный фермент – лигаза. Второй шаг заключается в создании точки ветвления, необходимой для формирования крестообразной структуры. Это возможно при использовании фрагментов ДНК со специфической последовательностью азотистых оснований (палиндромом). Крестообразные структуры встречаются в молекулах ДНК, выделенных из бактерий. У искусственно созданной крестообразной молекулы ДНК можно при помощи ферментов сделать липкие концы. Эти концы обеспечивают соединение с соответствующими комплементарными фрагментами других молекул ДНК. В результате последовательного сшивания липких концов формируется плоская нанорешётка. Из-за подвижности молекулы ДНК в точке ветвления жесткость получившейся наноструктуры не очень высока. Чтобы ее повысить, разработаны приемы наноконструирования, которые можно назвать «дополнительными» к подходу Н. Зимана. Так, в 1994 году Кристоф Нимейер (Германия) предложил использовать молекулы ДНК, к которым пришиты фрагменты биотина и стрептавидина – белка, связывающего биотин. Этот прием позволяет создавать наноструктуры, имеющие форму замкнутых колец. В 1997 году американец Дональд Бергстром использовал для наноконструирования синтетические молекулы, состоящие из двух цепочек нуклеотидов, концы которых сшиты между собой жестким углеводородным мостиком. Из таких деталей можно создавать конструкции в виде звезд с несколькими лучами.

Невысокая жесткость наноструктур типа плоской решетки имеет и привлекательную сторону: такую решетку, при правильном подборе последовательности нуклеотидов, легко сгибать. Нед Зиман в 1991 году получил наноструктуру, имеющую форму куба с ребрами из молекул ДНК. Можно создавать и другие объемные конструкции, например сцепленные октаэдры и додекаэдры.

Технология Зимана сопряжена с большими экономическими затратами. Для ее применения нужны отрезки нуклеиновых кислот с заданной последовательностью азотистых оснований и целый арсенал ферментов – рестриктаз и лигаз – для расщепления и сшивания фрагментов ДНК в нужных местах. Готовые продукты необходимо аккуратно извлечь из реакционной смеси и провести тщательный анализ их свойств. На всех стадиях такого наноконструирования требуются современные методы контроля, в частности атомная силовая микроскопия.

Вторая стратегия конструирования – по типу «все сразу» разработана в лаборатории конденсированного состояния нуклеиновых кислот Института молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта. Она принципиально отличается от всех вариантов конструирования типа «шаг за шагом». Этот подход позволяет получить упорядоченную трехмерную структуру за один приём. Он основан на использовании не единичных молекул нуклеиновых кислот, а их жидкокристаллических дисперсий.

Жидкий кристалл – это структура, состоящая из упорядоченных молекулярных слоев. Эти слои сохраняют некоторые диффузионные степени свободы, характерные для поведения молекул в жидком растворе. Жидкие кристаллы можно сравнить с потоком бревен, сплавляемых по реке: в целом все они выстроены в одном направлении, по течению, хотя каждое бревно плывет само по себе. Жидкокристаллические дисперсии образуются, когда довольно жесткие «стерженьки» коротких фрагментов ДНК или РНК выталкиваются из водно-полимерного или водно-солевого раствора и группируются вместе. В результате такой группировки получаются довольно крупные частицы – жидкокристаллические «капельки» ДНК размером около 0,5 мкм. Их стабильность зависит от свойств раствора. В состав каждой частицы входят примерно десять тысяч молекул, которые располагаются ровными рядами на расстоянии 3-5 нм. Упорядоченность придает этим частицам свойства кристалла. Вместе с тем соседние молекулы образуют подвижные слои, т.е. сохраняют свойства жидкости. А это означает, что получившаяся структура представляет собой жидкий кристалл.

Важно то, что при образовании жидкокристаллической дисперсии молекулы нуклеиновых кислот сохраняют способность вступать в химические реакции, т.е. образовывать соединения с другими веществами.

Учёные смогли связать нуклеиновые кислоты жидкокристаллической дисперсии с соединениями антрациклиновой группы. Сделано это было по трём причинам:

1) антрациклины интересны с точки зрения медицины, т.к. среди них есть противоопухолевые антибиотики, например, дауномицин;

2) антрациклины образуют протяженные комплексы с ионами двухвалентных металлов;

3) антрациклины способны встраиваться симметричным образом между соседними молекулами нуклеиновых кислот.

Такая стабильная наноконструкция не распадается в водно-солевом растворе. Ее можно увидеть с помощью атомно-силового микроскопа. Соседние молекулы нуклеиновых кислот образуют слои, внутри которых и между которыми располагаются полимерные наномостики из чередующихся молекул антибиотика и ионов металла. Мостики придают всей конструкции жесткость, то есть диффузионная подвижность соседних молекул нуклеиновых кислот резко уменьшается. Созданная наноструктура была уникальной, поскольку наномостики из молекул антибиотика и ионов меди автоматически решали задачу упорядочения как соседних молекул в конструкции, так и молекул «гостей».

Итак, в конструкции из ДНК можно встраивать другие элементы, например, биологически активные вещества. Именно эта особенность даёт возможность практически применять наноконструкции. На основе ДНК с встроенными молекулами других веществ можно сделать биодатчики, которые смогут регистрировать определенные вещества, узнавать определённые молекулы.

На основе описанного выше способа наноконструирования, учёные института молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта и Института спектроскопии (г. Троицк) создали оптический прибор – дихромметр, с помощью которого можно эффективно «работать» с частицами жидкокристаллических дисперсий ДНК, свойства которых меняются в «ответ» на присутствие в анализируемой жидкости биологически активных веществ, нарушающих генетический материал клеток.

В 2003 г. на экспериментальном заводе РАН (г. Черноголовка) были изготовлены первые 10 образцов дихромметра. Портативный дихромметр (рис. 12) защищен патентами РФ, Германии, США и ряда других стран, имеет сертификат Госстандарта РФ и внесен в реестр измерительных устройств. Он был отмечен Золотой медалью выставки в

Брюсселе (2001), Золотой медалью Президиума РАН (2002) и получил Гранпри на конкурсе российских инноваций (2003). Прибор в комбинации с жидкокристаллическими биодатчиками позволяет обнаруживать более 40 различных соединений (генотоксикантов), нарушающих структуру молекул НК. Таким образом, появилась возможность контролировать все манипуляции с жидкокристаллическими дисперсиями НК как в лабораторных средах, так и в плазме крови [Мисюров Д., 2006].



Рис. 12. Биоаналитическая система на базе портативного дихрометра и биодатчиков на основе частиц жидкокристаллической дисперсии нуклеиновых кислот.

Если удастся осуществить трехмерное упорядочение единичных наноконструкций (кристаллизацию), то можно будет закристаллизовать внутри них соединения, которые плохо кристаллизуются в обычных условиях. Это позволит осуществлять тонкую очистку биологических веществ от посторонних примесей.

Нанoeлектроника пока еще не может полагаться на электропроводящие свойства только одной молекулы ДНК. Включение в ДНК-структуры частиц металла будет гарантировать электропроводность, необходимую для потенциальных применений в электронных устройствах, например в биодатчиках. В 1996 году ученые начали применять в качестве «строительных блоков» синтетические одноцепочечные фрагменты нуклеиновых кислот, пришитые к наночастицам коллоидного золота. Из таких «кирпичиков» удастся получить структуры, в которых частицы золота расположены на строго фиксированном расстоянии, кратном шагу витка двойной спирали. Если пришить к нано-

частицам золота сразу по несколько фрагментов, то можно создавать трехмерные наноструктуры с регулярным чередованием молекул нуклеиновых кислот и атомов золота. Сейчас внутрь наноструктур научились встраивать не только золото, но и другие металлы.

Выше был описан двигатель, сделанный из микромагнетиков, управляемых электромагнитным полем. Ещё более миниатюрных роботов можно будет получить, используя вместо достаточно больших и тяжелых магнитов другие

способы перемещения, т.е. разработав микронные движители. В 1999 года учёным удалось получить молекулярный двигатель на основе молекул ДНК. Размер сгибающегося по команде механизма шарнирного типа составляет четыре десятитысячных толщины человеческого волоса, что гораздо меньше, чем размер робота Ишиямы. Устройство изготовлено при помощи соединения двух двойных спиралей ДНК посредством ДНК-моста (рис. 13). При подаче определенного химического сигнала часть этой структуры изгибается. Разработанное устройство может стать основой для строительства сложных машин молекулярного масштаба. В перспективе это приведёт к созданию нанороботов. Новые нанороботы по размерам будут меньше клеток крови, но смогут прекрасно понимать их сигналы. Учёные предполагают, что наноробот, введённый в организм человека, сможет самостоятельно передвигаться по кровеносной системе и очищать его от микробов или зарождающихся раковых клеток, а саму кровеносную систему – от отложений холестерина.

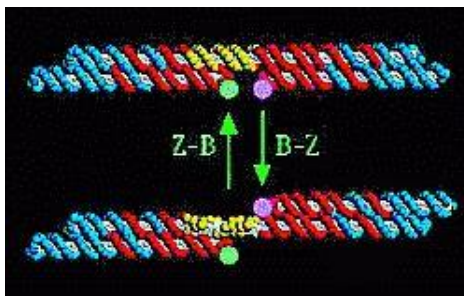


Рис. 13. Молекулярный двигатель на основе молекул ДНК.

Разработанное устройство может стать основой для строительства сложных машин молекулярного масштаба. В перспективе это приведёт к созданию нанороботов. Новые нанороботы по размерам будут меньше клеток крови, но смогут прекрасно понимать их сигналы. Учёные предполагают, что наноробот, введённый в организм человека, сможет самостоятельно передвигаться по кровеносной системе и очищать его от микробов или зарождающихся раковых клеток, а саму кровеносную систему – от отложений холестерина.

Практически единственным способом получить сложную молекулу-наноробота является органический синтез. Такой синтез очень дорог. В связи с этим одним из основных требований к молекулярным машинам является их самовоспроизводство. Затратив огромные усилия на разработку и синтез единственного наноробота, способного создать себе подобного, можно быть уверенным, что потраченный труд не пропадёт даром. Поэтому одним из приоритетных направлений развития нанотехнологии является создание так называемого **молекулярного ассемблера** – наноробота, собирающего другие молекулярные машины, используя в виде сырья отдельные атомы и простейшие молекулы из окружающей среды. Если такой ассемблер будет создан,



то половина проблемы окажется решенной. Вторая половина – это возможность управления им так, чтобы он собирал нечто осмысленное, а не просто кучку атомов. Такой прибор назвали молекулярным компьютером.

Пока учёным пока удалось лишь ограничить движение ДНК-устройства в молекулярной среде, но в будущем нанороботы станут полностью управляемыми машинами. Сейчас учёные работают над тем, чтобы управлять несколькими парами молекул автономно, без воздействия на другие. Они хотят запрограммировать молекулы ДНК так, чтобы эти молекулы могли в заданном порядке самоорганизоваться и объединяться с другими молекулами в более крупную структуру. Они уже научились внедрять в молекулу ДНК искусственные фрагменты и тем самым изменять конфигурацию ДНК-машины. Созданная учёными ДНК-машина имеет две своеобразные «руки» – молекулы, которыми исследователи научились управлять, но сделать что-либо, например, добавить в раствор определённый химикат, устройство не способно: пока раствор воздействует на все молекулы одновременно и равномерно.

Итак, нанороботы – это (пока) гипотетические устройства размером в единицы и десятки нанометров, которые могут самостоятельно манипулировать отдельными атомами. Переставляя атомы, нанороботы смогут самовоспроизводиться, создавать из произвольного материала любые предметы. Изменениям могут подвергаться практически любые – как органические, так и неорганические вещества. Оптимисты утверждают, что нанороботы посредством манипуляций с молекулами смогут создать любой предмет или существо.

Но вернёмся к реальным достижениям нанотехнологии. Нанометровые устройства, которые перемещаются вдоль очень тонких стержнеподобных нитей, и таким образом осуществляют интенсивное движение молекулярных грузов внутри биологических клеток, называют молекулярными машинами. Три снимка (рис. 14) показывают транспортировку микрометровой капельки (указана белой стрелкой) в 0, 4 и 8 секунд от начала процесса. Капелька тянется молекулярными машинами, которые слишком малы, чтобы их можно было увидеть, вдоль параллельных нитей, которые помещены на поверхность субстрата. Все нити выстроены таким образом, что их «положительный» конец расположен справа и формируют многополосную магистраль в нанорежиме. Капля перемещается на расстояние около 8 микрометров за 8 секунд; за это время каждая машина делает около 800 шагов.

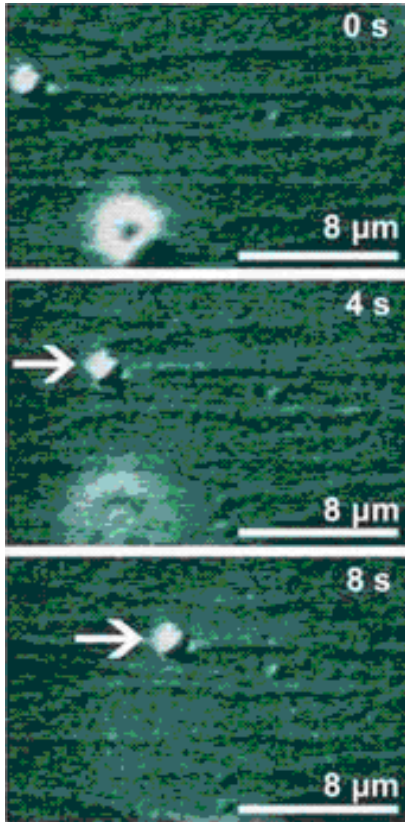


Рис. 14. Перемещение микрокапли по нанонити.

И машины, и нити можно выделить из клеток организмов и использовать для конструирования транспортных систем подобных биологическим.

Сейчас учёные изучают поведение одиночных машин. Эти машины являются димерными протеинами (белками) с двумя «ногами», которые делают дискретные шаги вдоль нитей. Каждый шаг приводит к смещению машины приблизительно на 10 нанометров, и сравним с длиной ее ног. За одну секунду, мотор делает около 100 шагов, что приводит к скорости около 1 микрометра в секунду. Абсолютное значение этой скорости не очень впечатляющее, но в относительном размере, молекулярные машины двигаются очень быстро: в макроскопической шкале, их движение будет соответствовать атлету, который бежит со скоростью 200 метров в секунду! Это более чем неожиданно, так как машины двигаются в очень вязкой среде и постоянно подвергаются множеству столкновений с большим числом молекул воды.

Из-за этих столкновений, машины имеют ограниченную длину пробега: после нескольких секунд, они отделяются от нитей и совершают броуновское движение в окружающей среде до тех пор, пока не свяжутся снова с той же или другой нитью.

Для того чтобы понять молекулярный машинный перенос в клетке и биомиметических системах, необходимо продвинуться дальше от уровня одиночных машин, и рассмотреть кооперативное поведение многих наномашин. Для получения большого объема грузопереноса, понятно, необходимо использовать большое количество машин работающих параллельно. Тем не менее, когда несколько машин двигаются вдоль одного и того же трека, они могут начать сталкиваться друг с

другом и формировать молекулярные пробки. Эти пробки похожи на пробки на автомагистралях, но все же имеют значимые различия. Во-первых, машины не могут видеть другие машины и их груз до столкновения. Во-вторых, в противоположность нашим машинам, которые не могут покинуть магистраль, когда они застряли в пробке, молекулярные машины могут разрывать связи с нитями и, следовательно, уходить в третье измерение. Эти исследования в дальнейшем помогут создать новые транспортные наносистемы. Судя по тому, что на создание первой ДНК-машины ушло около 10 лет, первый наноробот появится через 5-7 лет.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

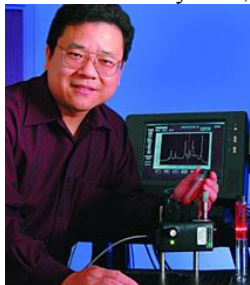
В медицинском применении нанобиотехнологий, есть три аспекта:

- 1) диагностический,
- 2) использование наночастиц в качестве переносчиков лекарств,
- 3) использование наночастиц в качестве самих лекарств и ядов.

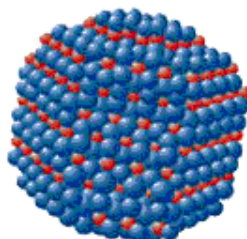
Примером использования нанотехнологий в медицинской диагностике могут быть квантовые точки – трехмерные полупроводниковые структуры, в которых движение электронов по трем координатам ограничено. Такой эффект достигается при вкраплении фракций полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны, отличной от ширины запрещенной зоны полупроводниковой матрицы подложки. Другими словами – **квантовые точки** – это кристаллы полупроводников нанометрового размера, которые имеют уникальные химические и физические свойства, не характерные для тех же веществ в макромасштабе. Это свойство делает их очень полезными в электронике, но мы сейчас рассмотрим другое свойство, характерное именно для нанокристаллов полупроводников – **интенсивную люминесценцию** в ответ на облучение с определённой частотой. Такую люминесценцию учёные и используют для нахождения и визуализации опухоли. Лидером этого направления исследований является американский учёный Шумин Не (Shuming Nie, рис. 15, а).

Растущая опухоль для своего питания выращивает дополнительные кровеносные сосуды. Система этих сосудов очень пористая и разветвлённая. Это позволяет микроскопическим кристалликам в ней накапливаться. Такой процесс визуализации злокачественного образования называют пассивным. Но есть и активный путь. Он даёт более точные и быстрые результаты. Квантовые точки могут быть химически связаны с молекулами антител, белков или ДНК. Эти комплексы могут быть спроектированы так, чтобы они обнаруживали другие молекулы, типичные для поверхности раковых клеток. В одном из опытов Шуми-

на Не нанометровые кристаллы селенида кадмия были соединены со специфическим антителом, реагирующим с молекулой-антигеном на поверхности клеток опухоли, привитой мышам (рис.15, б).



а



б

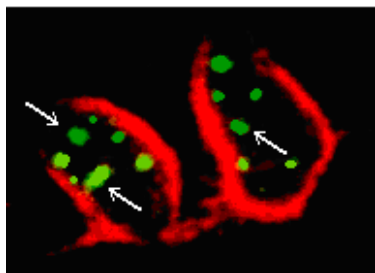
Рис. 15. Профессор Шумин Не (а). и нанокристалл селенида кадмия диаметром всего в пятнадцать атомов (б).

При регистрации опухолей возникла сложность – квантовые точки, введённые в организм, оказывались недолговечными. Нужно было найти способ защитить их каким-то щитом, в то же время, сохраняя все их способности по обнаружению и высвечиванию опухоли. Шумин Не окутал частицы-индикаторы специальным покрытием. Покрытие защищало, с одной стороны, сами квантовые точки от разрушения в организме, а с другой – не давало возможности ядовитому кадмию и ионам селена «освободиться» и попасть в организм. Квантовые точки вводили в кровеносную систему мышей. Кровь разносила их по организму. Кристаллы попадали в опухоль, и накапливались там (и практически нигде больше) (рис. 16). В результате чего опухоль легко можно было обнаружить визуально, посветив ртутной лампой. Квантовые точки дают намного более мощный отблеск света, чем применявшиеся ранее специальные красители или флуоресцентные белки. Сейчас проектируются квантовые точки, дающие отклик на любую длину волны, например, в ближнем инфракрасном спектре. Тогда можно будет находить опухоли, скрытые глубоко внутри тела.

В организм можно вводить квантовые точки несколько типов. Эти частицы будут фиксировать появление различных биомолекул или антигенов и таким образом, находить участки со специфическим сочетанием признаков заболевания. Этот существенно расширяет возможности диагностики, т.к. можно сконструировать тысячи разновидностей квантовых точек, соединяющихся в организме со строго определёнными участками ДНК. Шумин Не подобрал целую палитру световых откликов, которые позволяют отличать одни частицы от других. Это свойство кардинально отличает наномаркеры от органических пигментов, которые не могут работать в смеси – так как цвет также смешива-

ется. И вместо, предположим, красного, синего и лимонного получается какой-то «серо-буро-малиновый» цвет, ни о чём не говорящий исследователю. Квантовые же точки сохраняют индивидуальный отклик, чётко различимый приборами, даже будучи сваленными «в кучу».

В перспективе новые квантовые точки, соединённые с набором биомолекул, будут не только находить опухоль и индицировать её, но и поставлять точно на место новые поколения лекарств.



Перед человечеством стоит задача освоения глубокого космоса. Для этого необходимы очень длительные космические экспедиции. NASA пытается определить воздействие космической радиации на астронавтов в условиях длительных

полетов. Разрабатываются новые материалы для защиты космических экипажей от космических лучей. Однако последние достижения нанотехнологии должны помочь тем астронавтам, организмы которых уже поражены излучением. Нанотехнологи США уже разрабатывают метод лечения рака с помощью микроскопических магнитных сфер, вводимых в кровотоки пациентов. Исследователи из NASA планируют научить нанороботов залечивать нарушения в живых клетках, вызванных галактическими лучами. Наночастицы должны будут проникать внутрь клеток и восстанавливать их или, если имеется слишком большое повреждение, избавляться от этих клеток. Специалисты разрабатывают частицы размером меньше бактерии и даже – меньше длины волны видимого света. Простая инъекция может выпустить в кровоток человека миллионы этих капсул. И вот здесь начинается то, что кажется фантастикой – наночастицы должны будут использовать в своих интересах естественную систему передачи сигналов между живыми клетками, чтобы найти те из них, что повреждены радиацией. Триллионы клеток в человеческом теле общаются друг с другом посредством сложных молекул, встроенных в их собственные мембраны. Эти молекулы действуют как химические «флаги» для того, чтобы обратиться к другим клеткам или как химические «ворота», которые управляют входом в клетку специальных молекул из кровотока (например, гормонов).

Когда клетки повреждены радиацией, они производят специфические белковые маркеры, называемые CD-95 и размещают их на своих внешних оболочках. Так клетки «кричат»: «Я ранена, я ранена». Учё-

ные подбирают соответствующие молекулы, которые можно было бы закрепить на поверхности нанороботов. Такие молекулы должны соединиться с CD-95, как только окажутся поблизости от повреждённой клетки. Если лучевое повреждение велико, нанороботы должны войти внутрь клетки и выпустить из своих «запасов» ферменты, запускающие механизм самоуничтожения клетки. Если «рана» клетки не слишком велика — нанороботы делают «инъекцию» других ферментов, которые должны способствовать восстановлению ДНК и возвращению клетки к нормальной работе. Такие целебные ферменты уже известны, нужно лишь научиться доставлять их точно в цель.

Другим аспектом использования нанотехнологий в медицине является использование «управляемых» био-нанотрубок для внутриклеточной доставки лекарств. Био-нанотрубки – это полые цилиндры нанометрового размера, полученные из цитоскелета клеток. В любом организме микротрубочки выполняют многие важные клеточные функции – от обеспечения транспорта веществ до формирования веретена деления. Ученые калифорнийского университета выделили нанотрубки из клеток мозга коровы. На их основе они разработали «управляемые» био-нанотрубки с открытым или закрытым концом. Такие трубки могут быть применены для доставки лекарств или генов.



Рис.17. Строение липидно-белковых нанотрубок.

Строение нанотрубок показано на рис. 17. Липидно-белковые нанотрубки состоят из субъединиц белка тубулина. Белок покрыт липидным бислоем, который в свою очередь покрыт кольцами или спиралями из того же белка **тубулина**. Поперечный разрез нанотрубки и ее увеличенный фрагмент показаны в правой части рисунка справа. Контролируя относительное количество липидов и белков, можно переключаться между двумя состояниями нанотрубок: либо с открытыми концами (показано в центре), либо с закрытыми жировыми шапочками концами (слева). Этот процесс составляет основу для управляемой ин-



капсуляции и освобождения лекарств. Обнаружен ещё один путь регуляции состоянием нанотрубок. Изменяя электрический заряд липидного бислоя мембран и нанотрубок, можно открывать или закрывать био-нанотрубки или нанокапсулы. Нанокапсулы могут быть изготовлены и из неорганических материалов, например, из телурида кадмия.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Учёные, инженеры и специалисты пищевой промышленности анализировали перспективы наноеды на первой международной конференции NanoFood 2005, прошедшей 20-21 июня в Голландии. Организаторы конференции в качестве её логотипа выбрали круглую наночастицу, в решётке которой вместо атомов расположены яблоки (рис. 18).

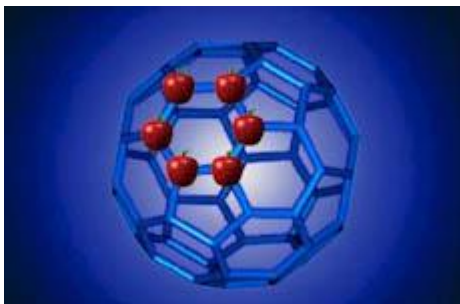


Рис.18. Логотип первой международной конференции по наноеде.

Наноеда – это целый набор научных идей, которые находятся на пути к реализации и применению в промышленности. Нанотехнологии могут предоставить пищевику возможность точно контролировать качество продуктов непосредственно в процессе производства. Для этого предполагают использовать диагностические наносистемы, в которых применены различные наносенсоры и квантовые точки. Они будут способны быстро и надёжно выявлять в продуктах мельчайшие химические загрязнения или опасные биологические агенты. По оценке учёных, первые серийные машины такого рода появятся на массовых пищевых производствах в ближайшие годы. Сейчас мировой рынок наноеды имеет объём около \$3 миллиардов. Это пока лишь прикладные нанотехнологии, которые приспособлены для нужд пищевой промышленности. К 2010 году, по оценке экспертов, данный рынок вырастет до \$20 миллиардов.

Итак, оптимисты считают, что нанотехнологии будут широко использованы в самых различных областях биологии, медицины и производстве продуктов питания.

Для медицины они планируют создать молекулярных роботов-врачей, которые будут «жить» внутри человеческого организма, устраняя в нём все возникающие повреждения, или предотвращая их возникновение, включая повреждения генетические. Прогнозируемый срок реализации – первая половина XXI века. Более того, предполагается, что с помощью нанотехнологий будет достигнуто личное бессмертие людей за счет внедрения в организм молекулярных роботов, предотвращающих старение клеток, а также перестройки и «облагораживания» тканей человеческого организма. Предполагается оживление и излечение тех безнадежно больных людей, которые были заморожены в настоящее время методами крионики. Прогнозируемый срок реализации: третья-четвертая четверти XXI века.

В биологии станет возможным «внедрение» в живой организм на уровне атомов. Последствия могут быть самыми различными – от «восстановления» вымерших видов до создания новых типов живых существ, биороботов. Прогнозируемый срок реализации: середина XXI века. В области охраны биосферы предполагают полностью устранить вредное влияния деятельности человека на окружающую среду. Во-первых, за счет насыщения экосферы молекулярными роботами-санитарами, превращающими отходы деятельности человека в исходное сырье, а во-вторых, за счет перевода промышленности и сельского хозяйства на безотходные нанотехнологические методы. Прогнозируемый срок реализации: середина XXI века.

В сельском хозяйстве оптимисты предполагают заменить растения и животных их искусственными аналогами – комплексами из молекулярных роботов. Такие роботы будут осуществлять те же химические процессы, что происходят в живом организме, однако более коротким и эффективным путем. «Нанофабрики», заселенные миллиардами искусственных нанороботов, смогут синтезировать любые белковые вещества на основе углекислого газа и воды, так будет решена как проблема пропитания все возрастающего населения Земли, так и проблема «глобального потепления», вызванная парниковым эффектом. Такое производство продуктов питания не будет зависеть от погодных условий и не будет нуждаться в тяжёлом физическом труде. По разным оценкам, первые такие комплексы будут созданы во второй – четвертой четвертях XXI века.

В месте с радужными прогнозами сторонников нанотехнологий специалисты в различных отраслях знания всё настойчивее высказы-

вают опасения относительно последствий широкого применения нанотехнологий. Рассмотрим их основные аргументы.

## ОПАСНОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Первые предположения о возможном возникновении движения против нанотехнологий предрёк один из американских специалистов ещё в 2001 году. В настоящее время специалисты располагают широким спектром доказательств негативного влияния наночастиц на организм животных. Учёные установили, что частички углерода диаметром 35 нанометров могут попасть в мозг человека через дыхательные пути и оказать на организм неизвестное, но, вероятнее всего, разрушительное воздействие. Американская исследовательница Ева Обердёрстер (рис. 19) обнаружила, что многообещающие наночастицы убивают дафний. Полулетальной дозой оказалась концентрация 800 наночастиц на миллиард. Выявленный эффект делает наноматериал «умеренным ядом»: он более ядовит, чем никель, хотя и же не так опасен, как бензапирен, который содержится в продуктах сгорания автомобильного топлива.



Рис. 19 Ева Обердёрстер

Следующий опыт Е. Обердёрстер провела на окунях. Фуллерены поместили в воду аквариума в концентрации 0,5 частей на миллион. По истечении двух суток ни одна из рыб не умерла и не показала изменений в поведении. Это могло бы успокоить, но у подопытных окуней были обнаружены серьёзные повреждения мембран мозговых клеток. Нарушения были в 17 раз сильнее по сравнению с контрольными рыбами. Кроме того, подвергнутые действию фуллеренов окуни в качестве иммунного ответа на воздействие наночастиц активировали специальные гены – т.е. они пытались защититься от инородных материалов. Из результатов этого эксперимента вытекает осторожный вывод: последствием встречи с наночастицами может быть повреждение мозга. Этот вывод подтвердили и коллеги Евы Обердёрстер. Они зафиксировали повреждение мембран человеческих клеток, растущих в культуре. Профессор химии Вики Колвин и его коллеги из американского университета Райса установили, что при растворении фуллере-

нов в воде формируются коллоиды  $C_{60}$ , которые при воздействии на клетки кожи человека и клетки карциномы печени вызывают их гибель. При этом концентрация фуллеренов в воде была весьма низкой: около 20 молекул  $C_{60}$  на 1 миллиард молекул воды. Одновременно исследователи показали, что токсичность молекул зависит от модификации их поверхности. Как предполагают исследователи, токсичность простых фуллеренов  $C_{60}$  связана с тем, что их поверхность способна производить супероксидные анионы. Эти радикалы повреждают клеточные мембраны и приводят к гибели клеток.

Однако следует отметить, что покрытие фуллереновых наночастиц более простыми молекулами может предотвратить вредное воздействие. В экспериментах с дафниями и рыбами покрытия не было. Вероятно, не все наноматериалы обладают такими же вредными для живых существ свойствами. Их «поведение» зависит не только от размера, но и от формы – являются ли они, к примеру, сферами или длинными трубками. Есть и другие различия. Так что делать обобщений не следует. Но изучать биологические эффекты наночастиц просто необходимо.

В ноябре 2006 в Санкт-Петербурге состоялась Международная конференция «The Nanobio-06», организованная Центром перспективных исследований СПбГПУ. На ней учёные специально отметили, что наночастицы легко проникают в дыхательные пути, через кожный покров, с водой и пищей прямо из окружающей среды. Кроме того, в перспективе предполагается широкое применение нанолечарств. Какое побочное действие все они могут оказать на живой организм, пока известно мало. Ситуация осложняется тем, что наноматериалы производятся и будут производиться разными способами, а значит, их влияние на организмы тоже может быть разным. Кроме того, наночастицы имеют свойство накапливаться в окружающей среде, легче, чем крупные структуры, вступать в химические реакции с образованием неизвестных продуктов. Риски с использованием наноматериалов – медицинская проблема. Но есть еще и такая проблема, как возможное использование наноматериалов террористами. Потому те и другие риски требуют серьезного изучения.

По данным издания «Вашингтон профиль», сегодня в США средства на анализ потенциальных угроз применения наноматериалов составляют 4% всех бюджетных ассигнований на нанотехнологии. А экологи требуют, чтобы они составляли 10-20% всех государственных затрат на нанотехнологии. Учитывая потенциальную опасность наноматериалов, американская Комиссия по безопасности пищевых продуктов и лекарств (FDA) недавно заявила о необходимости лицензирования и регулирования широкого спектра товаров (пищевые продукты,

косметика, лекарства, аппаратура и ветеринария), изготовленных с помощью нанотехнологий и использующих наноматериалы и наноструктуры.

В свете результатов, полученных Евой Обердёрстер, отметим, что пока ещё никто из людей не употреблял наноеду, но предварительные разработки таких продуктов уже идут. Специалисты говорят, что съедобные наночастицы могут быть сделаны из кремния, керамики или полимеров. И разумеется – органических веществ. Однако, если в отношении безопасности так называемых «мягких» частиц, сходных по строению и составу с биологическими материалами – всё ясно, то «твёрдые» частицы, составленные из неорганических веществ – это большое белое пятно. Учёные ещё не могут сказать, по каким маршрутам подобные частицы будут путешествовать в теле, и где в результате остановятся. Это ещё предстоит выяснить. И есть все основания к тому, чтобы специалисты факультета биотехнологии и ветеринарной медицины ОрёлГАУ включились в разрешение этой сложной, но очень актуальной проблемы.

Однако нанотехнологии, кроме негативных биологических воздействий, могут вызвать и другие негативные последствия. Примем во внимание тот факт, что сегодня неизвестны сложные компьютерные программы, которые не имели бы ошибок. А ведь они значительно проще, чем программы, которые потребуются для управления и синхронизации работы триллионов микроскопических существ, путешествующих по человеческому телу, для организации быстрой обратной связи с ними, отслеживания их работы в реальном масштабе времени. Никто не даст гарантии, что первое же поколение нанороботов, запущенное в человеческий организм, под влиянием самых разных причин не допустит ошибок при сборке и не создаст неуправляемые версии саморазмножающихся устройств.

Представьте себе, что в нанороботе, предназначенном для деструкции промышленных отходов до атомов, произойдет сбой и в результате такого сбоя робот начнёт уничтожать полезные вещества биосферы, обеспечивающие жизнь людей. Принимая во внимание, что такие нанороботы должны будут уметь самовоспроизводиться, можно дорисовать в воображении ужасную картину их тотального «размножения» и уничтожения всей биосферы.

Перед нанотехнологией давно поставлена гипотетическая проблема. Её имя – «серая слизь» (gray goo problem). Введение этого термина в науку приписывают американцу Эрику Дрекслеру (Eric Drexler). В 1981 году он опубликовал научную работу, посвящённую проблемам нанотехнологии, а в 1986 издал книгу «Машины созидания» (Engines of Creation), где речь шла о самовоспроизводящихся роботах размером с молекулу, которые, например, могли уничтожать раковые клетки в человеческом организме. Вскоре появились предположения, что же произойдёт, если такие нанороботы выйдут из-под контроля. В худшем случае, всё живое на Земле будет разобрано на молекулы, которые затем будут бесконечно копироваться, и толстый слой серой слизи покроеет Землю.

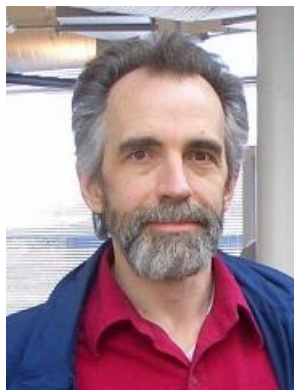


Рис.20. Эрик Дрекслер.

Если наноробота научат лечить, то и уничтожению обучить его будет не сложно. При современном развитии генной инженерии существует принципиальную возможность создания устройств, выборочно разрушительных: например, воздействующих на определённые этнические группы или заданные географические районы.

Можно представить себе и нанороботов, запрограммированных на изготовление уже существующего оружия. Овладев секретом создания подобного робота, или каким-то образом достав его, воспроизвести универсального «малыша» в большом количестве сможет небольшая группа людей или даже террорист-одиночка.

Детальный анализ возможных негативных последствий развития нанотехнологий сделал профессор кафедры науки и инженерии университета штата Массачусетс Томас Маккарти в статье «Война в эпоху невидимых машин». Он утверждает, что опасность нанотехнологий вовсе не в том, что нанотехнологии станут причиной несчастных случаев, и не в возможности злоупотреблений ею. Скорее, опасения вызывает её нормальное, правильное использование как инструмента.

Нанотехнологии могут стать причиной конфликта, если мировые державы будут разрабатывать нанотехнологии разными темпами и с переменным успехом. Неравномерность этого развития дестабилизируют отношения между странами, что приведёт к переустройству мира. Нынешняя государственная иерархия разрушится. К тому же, для организации стран экспортёров нефти (ОПЕК) развитие нанотехно-



гий в энергетике в качестве альтернативы природным энергоресурсам будет означать потерю власти. А у кого много нефти? У стран Ближнего Востока, которые вряд ли приветливо встретят нанотехнологии, что позволяет говорить о такой угрозе, как антинанотехнологический терроризм. Впрочем, боевые действия в эпоху нанотехнологий потеряют всякий смысл. Произойдёт это в результате коренного изменения характера войны по следующим причинам. Во-первых, нанотехнологии позволят создать оружие невиданной разрушительной силы. Во-вторых, это будет невидимое оружие. В-третьих, цель у этого оружия будет одна – люди.

Современное оружие массового уничтожения можно обнаружить даже вопреки желанию государства-хозяина. В случае же с оружием, изготавливаемым с помощью нанотехнологий, ни о каком сокращении новооружий и контроле над ним не может идти речи. Нанотехнологии не только сделают средства уничтожения супермикроскопических размеров, но и миниатюризируют средства их производства. Сегодня, чтобы победить врага, достаточно уничтожить его самолёты, танки и подобную им технику – и война выиграна. Но если это невидимое нанооружие, которое легко производится на таких же невидимых фабриках? Уродливые серые здания военных заводов уйдут в прошлое, уступив место дешёвому и быстрому молекулярному производству нанооружия. Небольшие фабрики вырастут как сорняки: вместо одной уничтоженной тут же появится новая. В итоге, применение нанотехнологического вооружения будет означать одно – полное истребление населения враждебного государства, геноцид. При этом та же нанотехнология будет делать «избранные» группы людей фактически бессмертными.

Вместе с тем невидимое нанооружие уравнивает страны в военной мощи. Представьте себе средства уничтожения, которым невозможно дать характеристику – ни количественную, ни качественную. Вдобавок ко всему, это будет оружие, способное к самовосстановлению и самовоспроизводству. Единственным выходом из этой патовой ситуации представляется мир во всём мире, переполненном одинаково смертельным оружием у одинаково опасных государств, которые должны создать мировое правительство. Вероятность того, что государства пойдут на это – 50:50, поскольку в эпоху нанотехнологий не будет прежних супердержав, и ни у одной из сторон не останется кнотов и пряников. Нанотехнологии войдут в нашу жизнь через электронику, медицину и производство оружия, а потом обязательно изменят мир. Вопрос в том, насколько сильно.

Эта тревожная перспектива побудила Билла Джоя (Bill Joy), одного из разработчиков универсального языка программирования Java, при-

звать на страницах журнала «Wired» к частичному мораторию на исследования в некоторых областях нанотехнологий. С тех пор нано-апокалиптики и нанооптимисты ведут горячие дебаты о проклятиях и благословениях новой технологии. Впрочем, к этим острым дебатам всерьез относится только пресса, а не учёные. Они скромно и упорно занимаются своим делом – исследованиями. У нас есть возможность присоединиться к ним. Но одного желания мало. Нанотехнологические разработки лежат в области очень высоких технологий и требуют значительного финансирования. Каков же их объём в разных странах?

### **ФИНАНСИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

Финансирование правительством США программы «Государственная нанотехнологическая инициатива» началось еще в 1996 году. В 1999 г. на развитие нанотехнологий правительством США было направлено 232 млн. долл. В 2002 году на реализацию этой программы было выделено уже полмиллиарда долларов! Сумма денег, выплаченная в 2003 году только один Подкомитет по науке, технологиям и космическим исследованиям при Сенате США финансировал государственные нанотехнологические разработки в размере 446 млн. долларов. Причём в эту сумму не входят деньги, выделяемые по линии министерства обороны США. А ведь кроме этих государственных учреждений огромное количество коммерческих организаций и фондов финансируют разработки в области нанотехнологий. В 2004 году на исследования в рамках проекта «Национальная нанотехнологическая инициатива» был выделен 1 миллиард (!) долларов. Все эти средства распределялись между различными отраслями экономики США. На них проводили исследования в Национальном институте стандартов и технологий, Национальном научном обществе, NASA, в системе общенациональных институтов здравоохранения, министерстве энергетики, Агентстве по защите окружающей среды и даже в министерстве юстиции.

В России целевое бюджетное финансирование работ в области наноматериалов и нанотехнологий осуществляется с начала 90-х годов прошлого века в рамках нескольких программ, которые входят как соответствующие разделы в ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники», ФЦП «Национальная технологическая база» и ряда других программ. На реализацию ФЦНТП в 2005 году было выделено 2,1 млрд рублей. В 2006 году сумма достигла 2,8 млрд., а 2007-м запланировано около 5 млрд. С 2008 года ежегодный прирост финансирования составит 25-30 процен-

тов. Дальнейшая интенсификация нанотехнологических разработок очень актуальна, т.к. уже в недалеком будущем развитие высокотехнологичных отраслей техники (электроника, связь) и социальной сферы (медицина, охрана окружающей среды), определяющее уровень развития страны, ее обороноспособность и национальную безопасность, будет в значительной степени обусловлено достижениями в области нанотехнологий.

Развитие наносистемных исследований и разработок в нашей стране потребует поддержки бюджетными и внебюджетными фондами, работающими в научно-технической сфере. В РФФИ целесообразно сформировать специальный «наносистемный» блок, в Российском фонде технологического развития в нормативном плане предложено оптимизировать сроки возврата средств по проектам, формирующим основы nanoиндустрии. Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и Российский гуманитарный научный фонд могут способствовать исследованиям влияния нанотехнологий на социальную структуру общества.

В начале сентября 2006 г. правительство обсудило Федеральную целевую программу “Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в РФ” на 2007-2010 годы. Министр образования и науки А. Фурсенко сообщил, что, по мнению западных аналитиков, по объему проводимых исследовательских работ в области нанотехнологий Россия уступает США и Японии, но превосходит большинство стран Европы, Америки, Азиатско-Тихоокеанского бассейна, включая Китай. В рамках ФЦНТП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники” на 2002-2006 годы реализуются девять инновационных проектов, являющихся продуктом «государственно-частного» партнерства.

А. Фурсенко указал на две основные задачи, которые необходимо решить для реализации комплексной системы государственной поддержки nanoиндустрии в России: 1) повышение эффективности и результативности государственных расходов на проведение НИОКР; 2) формирование приборно-инструментальной базы мирового уровня. Министр особо подчеркнул, что «главной проблемой, препятствующей широкому практическому внедрению нанотехнологий, остается критическое устаревание, а по отдельным направлениям – практическое отсутствие научного и специального оборудования, приборов и устройств, отвечающих современным мировым требованиям». Для решения этой проблемы Министерство образования и науки разработало проект ФЦП «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в РФ» на 2007-2010 годы. Программа должна за четыре года заложить «отвечающий современным требованиям материально-технический базис и

обеспечить функционирование составляющих инфраструктуры национальной нанотехнологической сети». В проекте программы предусмотрены создание исследовательской и технологической инфраструктуры для нанотехнологий; системы обмена информацией в этой области; подготовка кадров для проведения НИОКР и практического использования наноматериалов и нанотехнологий; создание научно-образовательных и научно-производственных комплексов; развитие центров коллективного пользования научным оборудованием; создание и развитие технологической и производственной базы, способной обеспечить проектирование и изготовление оборудования, приборов и инструментов; выполнение мероприятий специализированных программ поддержки экспорта нанотехнологической продукции. Общий объем финансирования программы составит около 29 млрд. рублей (в ценах соответствующих лет), в том числе за счет средств федерального бюджета – 28,2 млрд рублей.

Успешное развитие нанотехнологий в России даст нам шанс вернуться в когорту мировых лидеров в научно-технической, экономической и политической сферах, решить территориальные и демографические проблемы.

## ЦИТИРОВАННАЯ И РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Андерс Р., Уайтсайдс Дж., Эйглер Д. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. –М.: Изд-во «Мир», 2002. –292 с.
- Балабанов В. Нанотехнологии. Наука будущего. –М.: Изд-во «Эксмо», 2009. –256 с.
- Балабанов В.И, Балабанов И.В. Нанотехнологии. Правда и вымысел. – М.: Изд-во «Эксмо», 2010. –384 с.
- Баллюзек Ф.В., Куркаев А.С., Сенте Л. Нанотехнологии для медицины. –С-Пб: Изд-во «Сезам», 2008. –104 с.
- Белая книга по нанотехнологиям Антология. –М.: Изд-во «ЛКИ», 2008. –344 с.
- Бурень В.М., Бурень О.В. Биология и нанотехнология: Материалы для современной и будущей бионики. –М: «Феникс», 2006. –126 с.
- Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. –М.: Изд-во «Машиностроение», 2009. –312 с.
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. –М.: Изд-во «Физматлит», 2007. –416 с.
- Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. –М.: Изд-во «Бином», 2007. – 134 с.

- Лозовский В.Н. , Лозовский С.В. , Константинова Г.С. Нанотехнологии в электронике. Изд. 2-е. –М.: Изд-во «Лань», 2008. –336 с.
- Мисюрлов Д., 2006. <http://www.chemport.ru/datenews.php?news=44>
- Нанотехнологии в электронике. –М.: Изд. «Техносфера», 2005. –448 с.
- Нанотехнологии. Азбука для всех. /Под ред. Третьякова Ю.Д.. –М.: Изд-во «Физматлит», 2010. –368 с.
- Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. –М.: Изд-во «Техносфера», 2008. –438 с..
- Неволин В. Зондовые нанотехнологии в электронике. –М.: «Техносфера», 2005. –152 с.
- Рамбиди Н.Г. Нанотехнология и молекулярные компьютеры. –М.: Изд-во «Физматлит», 2007. –256 с.
- Рамбиди Н.Г., Березкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. –М.: Изд-во «Физматлит», 2009. – 456 с.
- Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. –М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. –240 с.
- Рыбалкина М. Нанотехнология для всех. –М.: Изд-во: «Nanonews-net.ru», 2005. –444 с. ISBN: 5-902954-01-0.
- Суздаев И.П. Нанотехнология. –М.: Изд-во:«КомКнига», 2006. –592 с.
- Тихонова Е.В., Морзунова И.Б., Губина Н.В.Проблемы современной нанотехнологии. –М.: Изд-во «Дрофа», 2010. –288 с.
- Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. –М.: Изд-во «Техносфера», 2008. –352 с.
- Хартманн У. Очарование нанотехнологии. –М.: Изд-во «Бином», 2008. –176 с.
- <http://www.chemport.ru/datenews.php?news=243>
- <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2006/>
- <http://www.nkj.ru/archive/articles/604/>
- <http://www.pcweek.ru/year1999/N29/CP1251/Strategy/chapt2.htm>
- <http://www.rosbalt.ru/2006/11/30/277110.html>
- <http://www.rsu.ru/rsu/nano/perspectives.html>
- <http://www.whsc.emory.edu/>
- <http://www.woodall.ncsa.uiuc.edu/>

[www.labogen.ru](http://www.labogen.ru)

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение . . . . .	3
Области применения нанотехнологий . . . . .	3
Истоки нанотехнологии . . . . .	4
Достижения и перспективы развития нанотехнологии в физике . . . . .	6
Достижения и перспективы развития нанотехнологии в химии . . . . .	10
Достижения и перспективы развития нанотехнологии в биологии. . . . .	15
Нанотехнологии в медицине. . . . .	23
Использование нанотехнологий в пищевой промышленности. . . . .	27
Опасности нанотехнологий. . . . .	29
Финансирование исследований в области нанотехнологий. . . . .	34
Цитированная и рекомендуемая литература . . . . .	36