

# Нанотехнология на службе человека

Ю. ГОЛОВИН

**Б**ЛИЖАЙШЕЕ ВРЕМЯ НАНОТЕХНОЛОГИЯ – чрезвычайно перспективное направление развития науки и техники – обещает проникнуть во все сферы деятельности человека, кардинально изменить производство, экономику да и жизнь в целом, подобно тому как на наших глазах это случилось в результате компьютерной революции в конце XX века. Однако по всем признакам и прогнозам последствия нанотехнологической революции будут еще обширнее

и глубже. Важно вовремя сориентироваться и выбрать свой путь в жизни с учетом этого важного обстоятельства.

С приставкой «нано» вы, конечно, уже знакомы. Она происходит от греческого *nános* – карлик и означает одну миллиардную долю какой-либо единицы: 1 нФ, 1 нс, 1 нА, 1 нм. Чаще всего под наномиром подразумевают мир отдельных объектов или связанных структур, имеющих характерные размеры от долей наномет-



ра до сотен нанометров. Нижняя граница определяется классическим радиусом атома порядка 0,1 нанометра, верхняя – размерами около 0,1 микрометра, при которых утрачивается специфика поведения и свойств наночастиц.

Нанотехнология за последние 5–7 лет из небольшого числа разрозненных специальных методов превратилась в обширную взаимосвязанную отрасль деятельности, в которую развитые страны вкладывают громадные средства, создавая наноцентры, открывая новые специальности в университетах, проводя десятки научных конференций в год. Сейчас под нанотехнологией понимают способность искусственно создавать или находить в природе, контролировать и использовать нанообъекты в различных сферах жизни на основе фундаментальных знаний в области физики, химии и биологии.

На обильно плодоносящем дереве нанотехнологии уже выросло много ветвей (рис.1): это наноматериалы, наноэлектроника и компьютеры следующего поколения, удивительные структуры на основе углерода – фуллерены и нанотрубки, нанолекарства и нанороботы для медицины, обороны, освоения космоса и многое другое. Даже представить себе нанообъекты не так просто, не говоря уже о том, чтобы их создавать и применять на практике. Однако многие окружающие нас предметы быта да и мы сами, как сложно устроенные биологические существа, содержим их в больших количествах. ДНК, белки, жиры, углеводы, играющие важнейшую роль в любом организме, имеют нанометровые размеры.

Около пяти тысяч лет назад человек впервые целенаправленно использовал нанообъекты – дрожжи, которые начал добавлять в тесто, сыры, виноградный сок



Рис.1. Дерево нанотехнологии

с целью получения более деликатесных продуктов питания из пищевого сырья. Совсем недавно (по историческим меркам) человек научился создавать высокопрочные наноструктурированные материалы, тонкие пленки и покрытия, фуллерены и нанотрубки, большие интегральные схемы и многое другое с размерами структурных элементов, лежащими в наношкале. Так, например, в процессоре Pentium-4 они составляют около 100 нм. (Это означает, что на срезе человеческого волоса диаметром порядка 50 мкм можно разместить около 200 тысяч таких элементов.) Реальные размеры пластинки из суперчистого кремния, на которой методами планарной технологии создаются микропроцессор или динамическую память для современного компьютера, составляют около 1 см<sup>2</sup>, что позволяет разместить на этой подложке, или, как говорят, чипе (от английского chip – осколок, кусочек), несколько миллиардов элементов (это число сопоставимо с числом жителей Земли).

Однако во многих случаях и этого оказывается недостаточно, и на повестке дня стоит задача неуклонного уменьшения размеров отдельных элементов и одновременного увеличения их количества на чипе. Каковы же физические (не технические) пределы миниатюризации? Они определяются размерами отдельных атомов (молекул) и электронными процессами в них. В принципе, можно себе представить все компоненты, необходимые для создания компьютера, выполненные на отдельных молекулах. И такие элементы уже созданы в лабораториях. Строительными блоками в них являются отдельные атомы, а цементом, который их скрепляет, – межатомные силы. Независимо от типа, эти силы меняются с расстоянием очень похоже (рис.2). Это дает возможность реализовать совершенно новый подход к любой технологии (рис.3): не «сверху–вниз», т.е. от большой заготовки к меньшему изделию путем отсечения ненужного материала и превращения его в отходы, а «снизу–вверх», т.е. путем безотходной сборки необходимого изделия из отдельных атомов и молекул. Такой подход обещает в корне изменить наши представления о технологии, внешнем виде и назначении искусственно создаваемых продуктов.

Чем же так привлекательны сами по себе нанообъекты и наноструктуры? Можно назвать множество причин: ничтожное количество необходимой для их производства энергии и сырья, практическая безотходность и экологическая безвредность, возможность создавать очень сложные и вместе с тем очень компактные изделия для электроники, космонавтики, медицины. Особо привлекательно то, что свойствами таких объек-

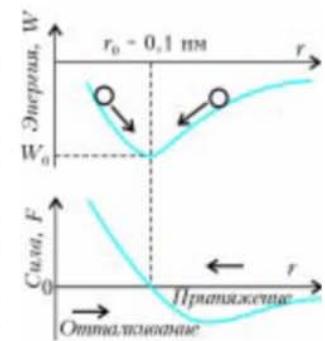


Рис.2. Энергия и сила взаимодействия между атомами

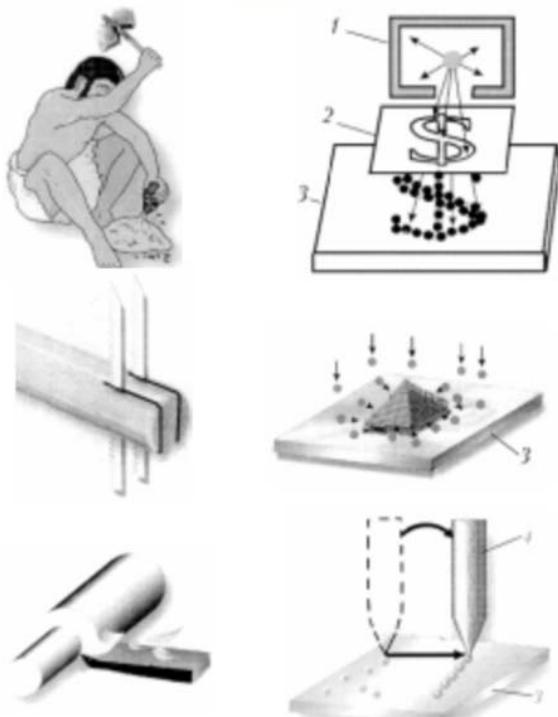


Рис.3. Две технологические парадигмы: «сверху–вниз», т.е. обкалывание, отпиливание, обтачивание, и «снизу–вверх», т.е. молекулярно-лучевая эпитаксия, самосборка наноструктур на поверхности подложки, атомные манипуляции и сборка с помощью иглы туннельного зондового микроскопа (1 – источник ионов или атомов, 2 – маска-рафарет, 3 – подложка, 4 – игла туннельного зондового микроскопа)

тов можно управлять простым изменением размеров, поскольку в области  $R_c \leq 100$  нм начинают проявляться так называемые масштабные эффекты. Для различных свойств (механических, электрических, магнитных, химических и др.) этот критический размер  $R_c$  может быть разным даже для одного и того же вещества, впрочем как и характер изменений этих свойств при  $R \leq R_c$ .

Основные причины появления размерных эффектов в наномасштабных объектах связаны, например, с тем, что доля  $\alpha$  атомов, находящихся в тонком приповерхностном слое ( $\sim 1$  нм), растет с уменьшением размера частиц вещества  $R$ , поскольку  $\alpha \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$  (здесь  $S$  – площадь поверхности частицы,  $V$  – ее объем).

Кроме того, известно, что атомы, находящиеся на поверхности, обладают свойствами, отличающими их от объемных, так как они связаны с окружающими их атомами по-иному, нежели в объеме. В результате на поверхности может произойти атомная реконструкция и появится другой порядок расположения атомов (что реально и происходит, например, в приповерхностных слоях монокристаллического кремния – основы современной полупроводниковой техники). Для атомов, находящихся на краях моноатомных террас, уступов и впадин на них, возникают совершенно особые условия.

Взаимодействие электронов со свободной поверхностью приводит к появлению специфических приповерхностных состояний. Все это вместе взятое дает основание рассматривать приповерхностный слой как некое новое состояние вещества. В связи с этим во многих задачах (особенно в химии) наночастицами считают такие, у которых доля поверхностных атомов превышает 0,1. Тогда для частиц разных форм соответствующий характерный размер  $R_c$  будет составлять десятки нанометров.

И еще. Поверхность является «стоком» почти бесконечной емкости для большинства дефектов кристаллической структуры благодаря действию так называемых сил изображения и других причин. (Силы изображения получили свое название по методу расчета, который заключается в помещении симметричного за границей раздела мысленного точно такого же объекта, но противоположного знака.) Силы изображения убывают по мере удаления от поверхности, но если размер частички достаточно мал, то они могут «высосать» из объема на поверхность большинство дефектов и сделать его более совершенным в структурном и химическом отношении.

Другая группа физических причин размерных эффектов состоит в следующем. В любом явлении переноса (электрический ток, теплопроводность, пластическая деформация и т.п.) носителям можно присвоить некоторую эффективную длину свободного пробега  $R_f$ . При  $R \gg R_f$  рассеяние (или захват и гибель) носителей происходит в объеме и слабо зависит от геометрии объекта, а вот при  $R < R_f$  ситуация радикально меняется и все характеристики переноса начинают сильно зависеть от размеров образца. В случаях, когда для возникновения нового состояния требуется образование зародыша критического размера  $R_n$  (кристаллизация, полиморфные переходы, зарождение магнитного домена или дислокационной петли и т.п.), в частицах с размерами  $R < R_n$  этот процесс блокируется, что меняет все термодинамические параметры таких переходов.

Большую перспективу применения в наноэлектронике, наносенсорной технике и т.п. имеют низкоразмерные квантовые структуры, интенсивно изучаемые физиками в последние несколько десятилетий. Обычно это полупроводниковые или сверхпроводящие объекты, имеющие атомарный масштаб в одном, двух или трех направлениях. Их свойства могут резко отличаться от объемных для того же материала – вследствие яркого проявления квантовых закономерностей поведения.

Разумеется, возникает и ряд сложных вопросов. Как превратить уже имеющиеся знания в нанотехнологии и реализовать их в промышленных масштабах? Можно ли полностью предсказать свойства таких объектов? Как их контролировать? Не могут ли они представлять угрозу здоровью, безопасности, обороноспособности страны? Все это далеко не праздные вопросы. На значительную часть вопросов ответы уже есть, на некоторые – еще нет.

Нанотехнология уже разработала десятки, если не

сотни, методов конструирования наноструктур, нахождения и отбора их из природных биологических объектов. В коротком рассказе невозможно даже просто упомянуть их все. Остановимся на одном, весьма универсальном и многообещающем – на семействе зондовых сканирующих нанотехнологий. Первый из них – сканирующий туннельный микроскоп – был предложен Нобелевскими лауреатами (1986 г.) Г.Биннингом и Г.Рорером в 1981 году, но как средство нанотехнологии они развились в 90-е годы и сейчас включают десятки конкретных способов наблюдения, конструирования и контроля наноструктур атомарного масштаба. Общим для них является наличие атомно острого инструмента – зонда, который способен выполнять несколько функций. Такой зонд с помощью трехкоординатного пьезоманипулятора можно с высокой точностью перемещать в непосредственной близости от исследуемой поверхности. Эта точность в некоторых приборах достигает тысячных долей нанометра. (Среди производственников старой закалки бытует выражение «ловить мицроны», т.е. обрабатывать детали с точностью до единиц микрометра. Теперь пришло время «ловить» нанометры и даже их малые доли, т.е. работать в тысячи раз точнее.) Острие, подведенное к поверхности на расстояние порядка размера атома, начинает взаимодействовать с отдельными атомами. И это взаимодействие, конечно, зависит от микрогоеметрии поверхности на атомном уровне, от типа самих атомов, их химического состояния.

Поговорим немного об основных разновидностях зондовой нанотехнологии и ее возможностях.

Исторически первым был туннельный микроскоп. Его создание было стимулировано желанием иметь атомное разрешение при исследовании поверхности. Оптическая микроскопия не позволяет этого сделать в принципе. Из-за дифракции световой волны предельное разрешение ограничено примерно половиной длины волны света, на котором работает микроскоп. Для видимого света это соответствует теоретическому пределу разрешения порядка 200 нм (реально он, конечно, еще ниже), что примерно в 1000 раз больше размеров атомов. Современные электронные микроскопы, использующие вместо светового электронный пучок, могут в некоторых весьма редких случаях обеспечивать атомное разрешение. Но они очень дороги и сложны в эксплуатации, и никто не рассматривает их как технологическое средство.

В туннельном сканирующем микроскопе, аккуратно приближая зонд к исследуемой поверхности и подав на него небольшое напряжение (обычно единицы вольт), можно добиться, чтобы через зазор между острием и поверхностью потек слабый (~ 1 нА) туннельный ток. Он фиксируется электроникой и запоминается компьютером. Сканирование с помощью прецизионного пьезоманипулятора по поверхности образца дает возможность собрать информацию о ней от точки к точке. Затем по определенной программе компьютер строит из этих точек изображение поверхности. Слово «изображение» здесь надо понимать как условный визуальный образ, обобщающий большой объем информации о

свойствах поверхности (геометрических, электрических, химических, эмиссионных и др.) в удобной и привычной для человека форме.

Другой способ изучения поверхности основан на регистрации силы притяжения (это чаще всего силы Ван-дер-Ваальса, магнитные или электростатические силы) между кончиком острия и небольшой областью поверхности. Зонд при этом расположен на микроскопической балке, изгиб которой регистрируется с помощью лазерного пучка света. Такой вид микроскопии называют атомно-силовым.

Различные структуры, полученные с помощью зондовой микроскопии, представлены на рисунке 4. Зондовые микроскопы могут работать не только в высоком вакууме, какого требует электронная микроскопия, но и на воздухе, и в жидкостях, и в электролитах. С большим успехом зондовые методы применяют для исследования сухого трения, степени износа и т.п. на атомарном уровне. Но и это еще не все их достоинства. Довольно быстро было обнаружено, что их можно использовать в качестве «атомных пинцетов», т.е. активного инструмента манипулирования и перемещения отдельных атомов и молекул. Для этого зонд подводят к нужному атому и затем «перекатывают» его в заранее заданное место или переносят, оторвав от поверхности путем подачи на иглу повышенного напряжения. Результаты вы можете видеть на рисунке 5. Таким способом можно поэтапно построить диод, транзистор или даже целую электрическую цепь и реализовать заветную мечту физиков и электронщиков: перейти от многоэлектронных устройств к одноэлектроннике.

Дело в том, что сейчас любой самый современный прибор, например полевой транзистор в микросхеме, неэкономно «тратит» при переключении тысячи электронов, в то время как для перехода структуры из одного состояния в другое достаточно было бы перебросить с одного атома на другой всего лишь один электрон (рис.6,а). Относительно большие токи, кроме неэффективного расходования энергии, приводят к интенсивному тепловыделению, что ограничивает быстродействие и требует эффективного теплоотвода. Так что переход к одноэлектроннике с помощью нанотехнологии сулит много выгод: увеличение плотности монтажа, быстродействия и надежности работы.

Другая возможность – не перебрасывать электрон с одного атома на другой, а, оставляя его в одном и том же атоме, изменять его спин, т.е. собственный механический и магнитный момент (рис.6,б). Это еще более экономичный путь, который сейчас интенсивно разрабатывается в электронике, магнитной записи информации, физической химии и кинетике. Он получил название спинtronики.

Принципиально новый подход к электронике следующего поколения дает использование слабой сверхпроводимости. Основной элемент такой электроники – контакт Джозефсона (рис.7). В нем два сверхпроводника разделены тонкой (всего в несколько атомных слоев) пленкой диэлектрика (изолятора). Два таких контакта, включенных параллельно, образуют квантовый интерферометр, в котором ток, магнитное поле и

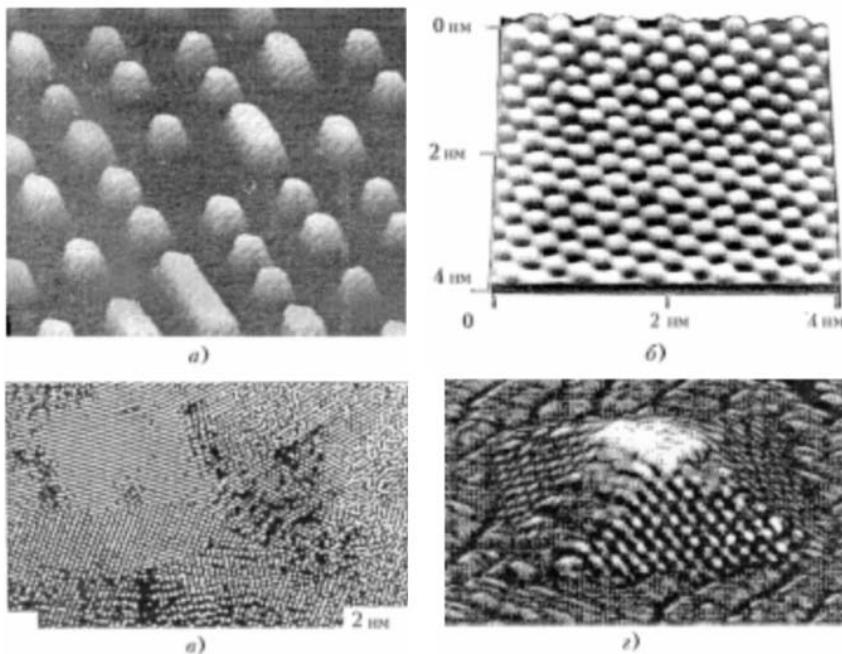


Рис.4. Различные структуры в сканирующем зондовом микроскопе: а) дорожка CD-диска; б) плоскость графита; в) нанокристаллический металл; г) германиевая пирамида из нескольких десятков атомов, выращенная методом самосборки

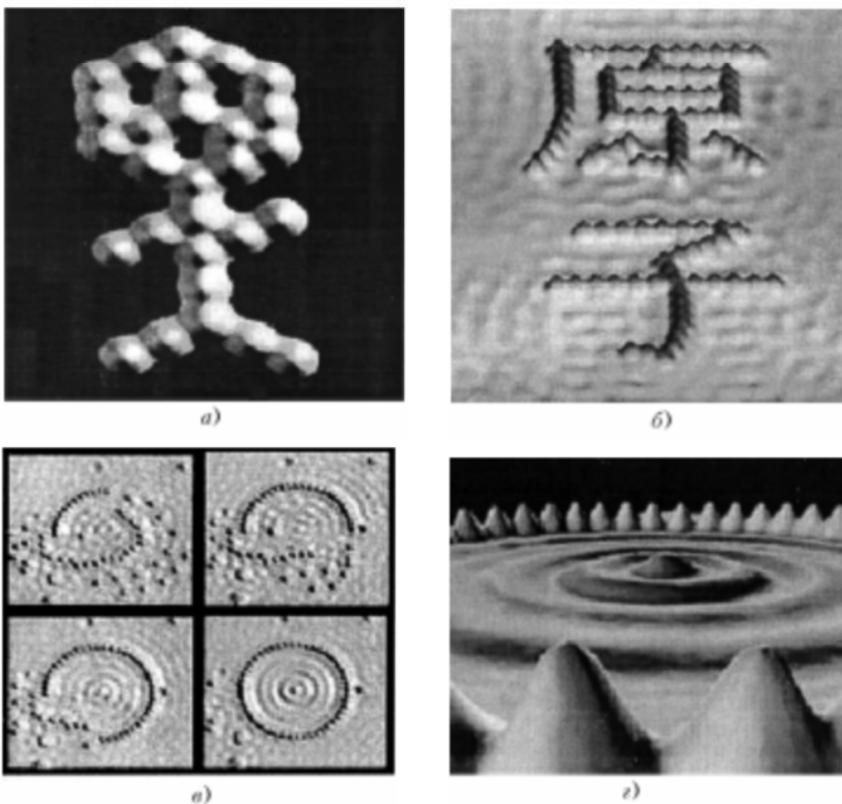


Рис.5. Результаты атомного дизайна: а) пляшущий человечек, изображенный несколькими атомами; б) японские иероглифы; в) и г) сборка квантового «загона» для электрона из нескольких атомов на поверхности

другие величины могут меняться только дискретно. Это очень удобно для цифровой электроники, которая практически вытеснила сейчас аналоговую почти из всех приложений. Время переключения в таких структурах может быть на два-три порядка величины меньше, чем в существующих транзисторах. Это означает, что на их основе могут быть созданы сверхскоростные процессоры с тактовой частотой порядка 1 ТГц ( $10^{12}$  Гц) для супер-ЭВМ нового поколения.

Еще больше перспектив у полностью квантовых компьютеров, которые могут быть построены на совершенно новых принципах. В отличие от классических электронных схем с сосредоточенными параметрами, они будут представлять собой устройства с распределенными параметрами, в которых распараллеливание (а значит, и ускорение обработки информации) будет достигать теоретического предела, положенного Природой, от которого современные компьютеры еще очень далеки. Такие компьютеры на основе так называемой быстрой одноквантовой логики смогут обеспечить решение задач, абсолютно недоступных нынешним компьютерам, например – управление экономикой, космическими аппаратами, ядерными реакторами, военными действиями и другими сложнейшими процессами в реальном масштабе времени.

Из всех разновидностей нанотехнологии наиболее быстрыми темпами сейчас развивается *нанобиотехнология*, что подразумевает полезное использованиеnanoобъектов и наноструктур биологического происхождения. Ими могут быть отдельные органические молекулы или даже клетки, из которых состоит все живое. Наиболее развитые разделы нанобиотехнологии – это расшифровка геномов различных организмов, в том числе и человека; трансгенная инженерия, т.е. изменение генетических свойств путем замены отдельных генов в молекуле ДНК; использование органических молекул в чипах

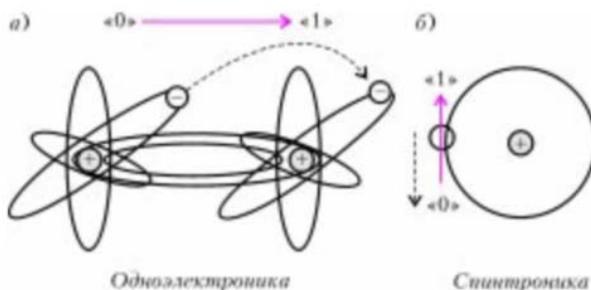


Рис.6. Принципы одноэлектроники (а) и спинтроники (б)

для электроники; внутриклеточные манипуляции и многое другое. Нанобиотехнологии нацелены на разработку принципиально новых лекарств и способов их доставки в необходимую точку, методов диагностики и лечения, на создание высокоеффективных пород сельскохозяйственных животных и сортов растений, гиб-

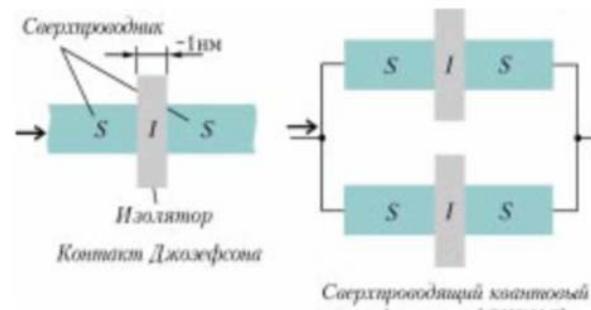


Рис.7. Слабая сверхпроводимость и сверхбыстрая дискретная электроника

ридных биоэлектронных устройств, сенсоров, анализаторов химического состава воздуха и воды, на нейтрализацию отходов и охрану окружающей среды.

Говоря о нанотехнологии, нельзя не упомянуть о теме, чаще всего эксплуатируемой в научно-фантастической и популярной литературе: самообучающиеся и саморазвивающиеся роботы с искусственным интеллектом. Прообразы таких роботов уже созданы, и они могут довольно многое: убирать помещения, управлять производственными процессами, обследовать поверхность других планет (Марса) и т.п. Для этого они имеют разнообразные сенсоры (аналоги глаз, ушей, пальцев человека) для восприятия обстановки и событий в окружающей среде, процессоры для быстрой обработки поступающей информации, гибкие адаптируемые программы для выработки и принятия решений, движители, исполнительные органы (захваты, «руки», скальпели...).

Промышленно выпускаемые роботы пока весьма громоздки, неуклюжи, медлительны, туповаты, если так можно сказать о машине. Перечень задач, которые им можно поручить, пока невелик. А хотелось бы, чтобы они могли заменить человека во всех опасных, вредных или просто рутинных делах. Зачем, например, человеку находиться возле доменной печи, ядерного или химического реактора, рисковать жизнью в открытом

космосе, если его можно будет с успехом заменить роботом? А как исследовать изнутри органы человека, мелкие сосуды, не прибегая к хирургической операции, как прицельно доставить микродозу лекарства в нужное место, провести при необходимости хирургическое вмешательство? Все это в принципе можно поручить нанороботам, сочетающим возможности перемещения внутри организма (например, по кровеносным сосудам) со способностями исследователя, диагноста, терапевта, микрохирурга. По частям такие функции уже реализованы в устройствах с габаритами порядка нескольких миллиметров, но они пока не универсальны и не могут проходить в мелкие сосуды, узкие проходы и т.п. Однако нет никаких сомнений, что в скором времени нанотехнология поможет создать таких кибер-докторов, которые станут бесценными ассистентами врачей-людей.

Итак, наука и высокие технологии открыли широкие ворота в наномир. Что сулит нам освоение новой глобальной технологической идеологии? Некоторые последствия легко предсказуемы, другие – менее очевидны и требуют специальных исследований. Вот некоторые из них.

1) Ясно, что экономики развитых стран, освоившие нанотехнологии, сделают крупный шаг вперед. Изменятся приоритеты и структура производства, потребуются рабочие, инженеры, менеджеры новой формации. Обновление продукции будет происходить очень быстро, так что всем придется непрерывно учиться. В ряде стран уже возникла экономика, самым ценным и прибыльным ресурсом которой являются знания, высокие технологии, а не газ, нефть, лес, запасы которых не бесконечны.

2) Объем рынка нанотехнологии через 10–12 лет сравняется с рынком информационных технологий, а потом и обгонит его.

3) Все окружающие нас вещи станут интеллектуальными за счет встраивания в них микрочипов. Они сами станут адаптироваться и оптимизировать режим работы применительно к создавшимся условиям. Иными словами, одежда будет лучше греть или проветриваться, температура и освещение жилища будут подстраиваться под человека, автомобили станут находить оптимальные маршруты перемещения и автоматически избегать столкновений и аварий и т.д.

4) Лекарства, диагностика, лечение будут более дешевыми и эффективными. Это сделает жизнь человека более здоровой и продолжительной.

5) Средства борьбы с терроризмом, военной угрозой станут более действенными, а жизнь – более безопасной.

6) Станет возможным решение многих задач по освоению космоса микророботами с искусственным интеллектом.

7) В связи с ростом производительности труда увеличится доля свободного времени, которое можно будет потратить на духовное развитие, образование, спорт, развлечения.