

## МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МАШИНЫ ЭРИКА ДРЕКСЛЕРА

*Д.А. МЕДВЕДЕВ, А.А. ПОПОВ*

### Введение

Несмотря на то, что еще в 1957 г. Ричард Фейнман обратил внимание научной общественности на то, что «там внизу много места»<sup>1</sup>, только в 1981 г. физики Генрих Рорер и Герд Бинниг в швейцарской лаборатории ИВМ создали сканирующий туннельный микроскоп, способный показывать отдельные атомы, а также поднимать их и переставлять с места на место. Через 5 лет за это достижение им была присуждена Нобелевская премия по физике. В 1989 г. другой сотрудник ИВМ, Дональд Эйглер, выложил на металлической пластине логотип своей компании из 35 атомов ксенона. Так началась эра нанотехнологий, когда человечество научилось создавать мельчайшие структуры «атом за атомом».

Нанотехнологии — это технологии глобального действия, применимые во всех областях человеческой деятельности. В частности, в настоящее время разрабатываются легкие сверхпрочные материалы для космической и военной техники, бронезилетов, авиационной техники. В электронной промышленности уже началось использование нанотрубок. Создаются поверхности и материалы с заданными свойствами для применения в быту (например, немнущаяся одежда, антибликовые покрытия, антипригарные покрытия, чистящие салфетки и т.п.). Многие из продуктов нанотехнологий уже стали привычными и воспринимаются как часть повседневной жизни.

Но потенциал молекулярных нанотехнологий неизмеримо больше, поэтому и интерес к ним столь высок. Это стало ясно, когда в 1986 г. «крестный отец нанотехнологии» Эрик Дрекслер издал первую научно-популярную книгу о нанотехнологиях «Машины творения». В 1991 г. он же первым среди ученых получил научную степень в области молекулярной нанотехнологии. А в 1992 г. выпустил научную монографию «Наносистемы: молекулярные машины, производство и вычисления»<sup>2</sup>, книгу, равной которой по полноте и глубине нет до сих пор<sup>3</sup>.

### Суть наномеханического подхода

Есть существенные отличия нанотехнологий от традиционных технологий. Во-первых, наши инструменты для работы на наноуровне еще несовершенны — производить с атомарной точностью мы пока можем лишь некоторые предметы. Во-вторых, на наноуровне привычные физические законы проявляются иначе: становятся заметными квантовые эффекты и взаимодействие между молекулами, тогда как сила тяжести и трение играют небольшую роль. Этим, в частности, обусловлены сложности проектирования и построения наноразмерных объектов.

На сегодняшний день в нанотехнологиях можно выделить *три направления*:

- создание наноматериалов (материалов с наноразмерными элементами) с помощью традиционных химических методов (так называемые «наномасштабные технологии»);
- попытки создания активных наноструктур с использованием белков, ДНК и других органических молекул;
- наномеханический подход, также называемый «молекулярное производство», в рамках которого создаются наноразмерные устройства, в т. ч. наномашин.

Первое направление наименее амбициозно и является продолжением традиционных химических и микроэлектронных технологий. Первоначально его вообще не относили к нанотехнологиям. Создание наноструктур на основе органики привлекательно кажущейся простотой использования существующих в живой природе образцов, но, в то же время, это направление изначально декларирует собственную ограниченность, связанную с использованием определенного класса «строительного материала». Поэтому эти два направления привлекательны, в основном, в относительно краткосрочной перспективе, а затем вероятно их замещение наномеханическим подходом как потенциально более совершенным.

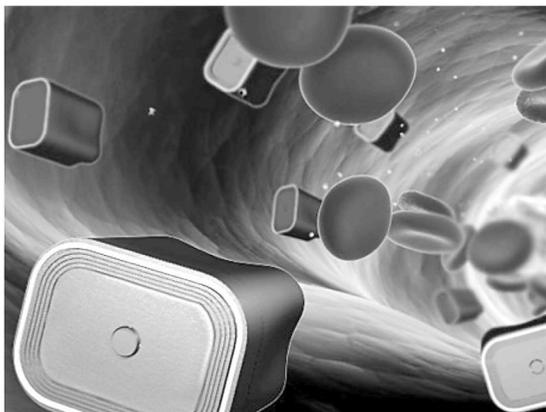
Принципиально важно, что развитие нанотехнологий не обязательно должно быть поступательным, поэтапным. Наномеханический подход может использоваться уже сейчас, и работа в этом направлении ведется Э. Дрекслером и рядом других авторов и организаций.

В основе наномеханического подхода лежит идея создания искусственных конструкций наноразмеров<sup>4</sup>, которые были бы приспособлены для выполнения необходимых действий. Со временем, писал Дрекслер, промышленные средства молекулярной сборки разовьются до уровня, когда станет возможным создавать нанороботов — устройства размером порядка сотен нанометров, выполняющие любые манипуляции с атомами вещества (в т.ч. сборку и разборку) по заданным программам.

Нанороботов, способных конструировать предметы из отдельных атомов или простых молекул, Дрекслер назвал ассемблерами. Если подобная сборка осуществляется в рамках единой системы, а не отдельными нанороботами, то речь идёт о нанофабрике. В любом случае, для работы с атомами, а затем с собранными из них блоками все больших размеров, будут использоваться наноманипуляторы<sup>5</sup>. Из-за сверхмалых размеров каждый манипулятор наноробота сможет работать с частотой до миллиона операций в секунду. За счет этой скорости и параллельной работы миллионов наноманипуляторов (либо в нанофабрике, либо у множества отдельных наноассемблеров) практически любой материальный объект можно будет произвести быстро и недорого в неограниченных количествах. В качестве сырья для работы нанофабрик или наноассемблеров можно будет использовать практически любые вещества: землю, химические и бытовые отходы; главное условие для сырья — наличие в нем в достаточном количестве всех химических элементов, входящих в состав производимого объекта.

Подобные нанороботы размером не больше бактерии, снабженные манипуляторами, двигателями и компьютерами, смогут выполнять любые задания по команде человека. Наномедицина будет способна исправить любые проблемы во всех клетках человеческого тела: очистить артерии от склеротических бляшек, уничтожить инфекцию или раковые клетки, даже перепрограммировать на генетическом уровне все клетки организма.

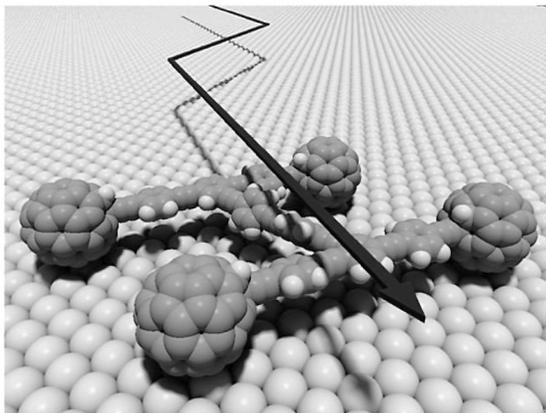
Первые шаги на пути к созданию наномашин уже делаются. С помощью компьютерных программ сейчас моделируются наноустройства, содержащие десятки тысяч ато-



*Хромаллоцит,  
универсальный  
генетический  
вектор –  
устройство для  
замены хромосом  
клетки  
(Freitas 2007)*

мов<sup>6</sup>. В настоящее время одним из ведущих нанотехнологов мира Р. Фрайтасом разработаны базовые проекты нескольких медицинских наноустройств: респироцит (искусственный аналог эритроцита), микробивор (замена лейкоцита)<sup>7</sup> и хромаллоцит (наноробот для замены хромосом в клетках)<sup>8</sup>. Крисом Фениксом разработан проект простой нанофабрики<sup>9</sup>.

В последние несколько лет был получен ряд отдельных результатов, демонстрирующих перспективность наномеханического подхода. Так, в 2005 г. был создан прототип «наноавтомобиля» – устройство из нескольких молекул-колес на шасси, которое движется по плоской поверхности, получая энергию в виде отдельных фотонов<sup>10</sup>. Разработаны



*«Наноавтомобиль»,  
прототип  
мобильного  
наноустройства,  
перемещающегося  
по золотой  
поверхности  
(Shirai et al 2005)*

несколько различных прототипов двигателей для нанороботов, в том числе на основе АТФ-синтазы. В 2007 г. ученые из Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли заявили о создании радиоприемника из одной нанотрубки, что демонстрирует принципиальную возможность для нанороботов использовать радиосвязь для обмена сигналами друг с другом и с управляющим компьютером.

Однако, как отмечает Э. Дрекслер<sup>11</sup>, форсированное развитие молекулярного производства невозможно в рамках отдельных научных проектов, а только в рамках единого скоординированного процесса по разработке подобной производственной системы, интегрирующей в себе отдельные разработки и технологии.

По прогнозам NNI (Национальная нанотехнологическая инициатива США), молекулярные наносистемы будут созданы около 2020 г.<sup>12</sup> По оценкам CRN (Центр ответственных нанотехнологий, США), при целенаправленном усилии, молекулярное производство (наноассемблеры или нанофабрики) могут стать реальностью уже к 2015 г.<sup>13</sup>

### **Перспективы молекулярного производства**

Нанофабрикам отводится ведущая роль в грядущей научно-технической революции. Простота проектирования и изготовления сложных конструкций позволит создавать сверхмощные компьютеры, превосходящие современные по быстродействию и объемам обрабатываемой информации в миллионы раз. Суперкомпьютеры в сочетании с нанороботами позволят подробно проанализировать структуру человеческого мозга и понять механизмы его работы. Это, в свою очередь, поможет ученым создать искусственный интеллект, превосходящий человеческий. Любую работу по обслуживанию людей и обеспечению их материальными благами можно будет передать машинам.

Люди получают возможность модернизировать свои тела, заменяя органы и ткани более совершенными. Будет возможно даже по собственному усмотрению изменить свой внешний облик, преобразившись до неузнаваемости. Виртуальные миры, поддерживаемые сверхмощными компьютерами, откроют для людей колоссальные возможности для

творчества и самореализации. Постройка сверхскоростных космических кораблей и гигантских жилищ в космическом пространстве приведут к быстрой экспансии человечества в космосе и непрерывному освоению пространства вокруг звезд и других источников энергии.

В то же время развитие нанотехнологий таит в себе и опасности. Наиболее неблагоприятный сценарий — появление «серой слизи» (*grey goo*): непрерывно размножающихся нанороботов (репликаторов), целенаправленно уничтожающих людей, животных, растения, всю органическую жизнь на планете. Такой сценарий вполне возможен при использовании нанороботов в качестве оружия.

Чтобы предотвратить развитие подобных сценариев, необходимы эффективные механизмы общественного контроля над развитием высоких технологий и, особенно, за прогрессом в области вооружений. Одна из концепций защиты, предложенная Дрекслером, состоит в создании активных щитов, которые будут сами обнаруживать вышедшие из-под контроля эксперименты и используемое оружие и самостоятельно уничтожать возникающие опасности. Однако для своего создания активные щиты сами требуют технологий молекулярного производства. Предложены и иные методы контроля потенциально опасных направлений нанотехнологий<sup>14</sup>.

### Политические аспекты

Надо сказать, что судьба наномеханического направления нанотехнологий, несмотря на очевидные преимущества, такие, как ясность целей и относительная простота дизайна, а также — потенциальная сверхперспективность, складывалась до последнего времени нелегко. Частично причина этого кроется именно в прогнозируемых радикальных последствиях молекулярного производства, выходящих за рамки привычного мировоззрения большинства людей.

Описанные Дрекслером идеи первоначально были подвергнуты критике рядом ученых. Итог этого спора оказался неоднозначным. В научном отношении критика дрекслеровских идей оказалась несостоятельной, а его модели выдержали проверку временем. Однако в обще-

ственном сознании и в политической среде критика оставила тяжелый след.

В 2000 г. этих критических публикаций, в т.ч. широко разрекламированных заявлений нобелевского лауреата Ричарда Смолли<sup>15</sup>, оказалось достаточно, чтобы изменить направление государственного финансирования Национальной нанотехнологической инициативы США. В результате бюджетное финансирование в значительной степени было направлено на уже существующие проекты в области химии. Старые проекты получили приставку «нано», а в обществе начал незаметно формироваться миф о уже идущем нанотехнологическом буме. Эмоциональные призывы Смолли, которые ученый и писатель Рей Курцвел охарактеризовал как «избегающие ключевых вопросов, лишенные конкретного научного содержания и полные неточных метафор»<sup>16</sup> временно взяли верх.

Большая часть стран в мире при создании национальных нанопрограмм брала США в качестве образца. В результате на данный момент почти во всем мире стратегии в области нанотехнологий основаны на предположении, что дрекслеровская концепция ошибочна, при том, что в США она выдержала всю критику, а в других странах этот вопрос даже не обсуждался. Риторика нанопроектов использует имя Дрекслера и некоторые его идеи, но финансовые решения неизменно консервативны, и средства идут на традиционные проекты.

Есть и исключения. Япония еще с начала 1990-х годов развивает нанотехнологии самостоятельно, причем, и там, судя по прогнозам института научно-технической политики NISTEP, потенциалу молекулярных машин уделяется недостаточное внимание. Активно развивают самые передовые идеи в области нанотехнологий в исследовательских центрах Сингапура, поэтому возможно, что этой стране удастся в ближайшее время вырваться вперед. Также есть основания полагать, что в Китае к этому направлению относятся весьма серьезно. Кроме того, вполне вероятно, что отдельные частные организации ведут работы по молекулярному производству и наномашинам, но надежной информации об этом пока нет.

Лишь в 2006 г. сторонникам Дрекслера удалось добиться первой лоббистской победы. Отчет Национального исследовательского совета национальных академий США, оценивающий деятельность NNI, рекомендовал финансирование изучения технической возможности методов молекулярного производства<sup>17</sup>. Не исключено, что в ближайшие несколько лет вопрос о финансировании этого направления будет в США решен положительно. Но даже в этом случае из-за инерции вряд ли это найдет отражение в нанотехнологической стратегии других стран до 2012 – 2015 гг.

В целом, хотелось бы отметить, что развитие нанопроизводства и создание нанороботов, без сомнения, в ближайшие годы начнет стремительно развиваться. Учитывая нарастающую конвергенцию технологий и ускорение прогресса, можно сказать, что последствия этого для цивилизации окажутся радикальными<sup>18</sup>. В осмыслении этого процесса и его перспектив философия также должна сказать свое слово.

#### Примечания

- <sup>1</sup> Фейнман Р.Ф. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики (с сокращениями) // Российский химический журнал. 2002 [1957]. Том XLVI. № 5.
- <sup>2</sup> См.: Drexler E.K. Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation. N.Y., 1992.
- <sup>3</sup> В России пока не издана ни одна работа Дрекслера.
- <sup>4</sup> Атомы и молекулы имеют размеры порядка  $10^{-9}$  м. Приставка «нано-» обозначает величину  $10^{-9}$ , именно поэтому появился термин «нанотехнологии» (его ввел Норио Танигути в 1974 г.).
- <sup>5</sup> Так, в 2007 г. на Foresight Unconference Роберт Фрайтас и Ральф Меркл представили набор из девяти молекулярных инструментов для механосинтеза нанообъектов. Это является важным шагом на пути к созданию нанофабрик и молекулярному производству.
- <sup>6</sup> Наиболее совершенной программой для такого моделирования является *Nanoengineer*, созданная компанией Nanorex при участии Э. Дрекслера. Программа бесплатна и доступна на сайте [www.nanorex.com](http://www.nanorex.com)
- <sup>7</sup> См.: Freitas R. Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell // Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology. 1998. Vol. 26.
- <sup>8</sup> См.: Freitas R. The Ideal Gene Delivery Vector: Chromalloyocytes, Cell Repair Nanorobots for Chromosome Replacement Therapy // Journal of Evolution and Technology. June. 2007. Vol. 16. Issue 1.

- <sup>9</sup> См.: *Phoenix C.* Design of a Primitive Nanofactory // Journal of Evolution and Technology. October 2003. Vol. 13.
- <sup>10</sup> См.: *Shirai Y., Osgood A., Zhao Y., Kelly K., Tour J.* Directional Control in Thermally Driven Single-Molecule Nanocars // Nano Lett. 2005. Vol. 5.
- <sup>11</sup> См.: *Baum R.* Nanotechnology: Drexler and Smalley make the case for and against “molecular assemblers” // Chemical & Engineering News. Vol. 81. № 48. 2003.
- <sup>12</sup> См.: *Roco M.* Nanoscale Science and Engineering: Unifying and Transforming Tools // AIChE Journal. May 2004. Vol. 50. № 5; *Roco M.* Доклад на конференции USC Nano Ethics Conference. 2 – 5 March 2005.
- <sup>13</sup> См.: Timeline for Molecular Manufacturing. Center for Responsible Nanotechnology, 2004.
- <sup>14</sup> См.: *Фраймас Р.* Проблема Серой Слизи. Российское Трансгуманистическое Движение. М., 2001.
- <sup>15</sup> В данной статье мы не будем подробно останавливаться на содержании этой дискуссии. Вместо этого отошлем читателя к следующим материалам, содержащим подробный анализ и разъясняющим научную и техническую необоснованность претензий Смоли (см.: *Kurzweil R.* The Drexler-Smalley Debate on Molecular Assembly. Kurzweilai.net, December 2003.)
- <sup>16</sup> Ibid.
- <sup>17</sup> Committee to Review the National Nanotechnology Initiative 2006.
- <sup>18</sup> См.: Новые технологии и продолжение эволюции человека? Трансгуманистический проект будущего / под ред. Валерии Прайд, А.В. Коротаява М., 2008.