

---

---

ОТРАСЛЕВЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ

---

---

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ  
(НА ПРИМЕРЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР)**

© 2009 г. А. И. Терехов

(Москва)

Выполнен наукометрический анализ исследований и разработок в области углеродных наноструктур. На основе доступной информации рассмотрены направления и перспективы практического использования углеродных нанотрубок, особенности коммерциализации нанотехнологических инноваций. Дан краткий очерк методов, как применяемых, так и полезных в будущем для многоаспектного анализа процессов развития нанотехнологии.

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнология<sup>1</sup> – выбранный правительствами многих стран научно-технический приоритет. Более 60 стран в настоящее время приняли национальные нанотехнологические программы, причем помимо всех развитых среди них есть и такие развивающиеся страны, как Индонезия, Малайзия, ЮАР и др. В послании Федеральному собранию в 2006 г. Президент РФ провозгласил создание российской нанотехнологической программы с целью вывода страны на одну из лидирующих позиций в мире. В апреле 2007 г. он утвердил инициативу “Стратегия развития nanoиндустрии”, предусматривающую формирование инфраструктуры Национальной нанотехнологической сети. Создана Российская корпорация нанотехнологий (ГК “Роснано”), которая, располагая среднегодовым бюджетом до 2015 г. около 1 млрд. долл., призвана обеспечить организационную и финансовую поддержку инновационной нанотехнологической деятельности. В 2006 г. доля нанотехнологии в расходах федерального бюджета на науку в России составляла около 5, тогда как в США – менее 1%<sup>2</sup>. Ввиду значительных размеров и концентрации выделяемых ресурсов важно их эффективно распределять и расходовать. Зарождение многих нанотехнологий находится пока еще на стадии фундаментальных научных исследований, поэтому формирование и управление исследовательским портфелем национальной нанотехнологической программы требуют самого серьезного внимания. Поскольку это ориентированные фундаментальные исследования, необходимы поддержка и развитие не только их самих, но и процесса превращения их результатов в интеллектуальную собственность. Наконец, без масштабной коммерциализации научных достижений невозможно добиться успеха в развернувшейся международной нанотехнологической гонке.

Наноматериалы составляют важнейшую часть нанотехнологии, они непосредственно пересекают грань между нанонаукой и нанотехнологией, связывая их вместе. Фундаментальное открытие фуллеренов в 1985 г. вызвало к жизни производство и применение структур и устройств посредством управления формой и размерами на наномасштабе. Последовавшее в 1991 г. открытие углеродных нанотрубок (УНТ) усилило эту связь. В результате УНТ стали практически идеальным материалом для эволюционной нанотехнологии, вышедшей в последнее время на передний план. Сказанное позволяет рассматривать УНТ как удобную “модель” для обсуждения и апробации ряда методов, способных помочь при решении перечисленных выше программных задач.

**1. РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ В ОБЛАСТИ УНТ: АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЙ  
И ПАТЕНТНОЙ СТАТИСТИКИ**

Развитие цивилизации, по существу, основано на новаторской разработке и использовании материалов: камень, бронза, железо, пластмасса – лишь несколько исторических вех этого про-

<sup>1</sup> На самом деле это “зонтный” термин для технологий, осуществляющих манипуляцию веществом в нанодиапазоне (примерно 1–100 нм; 1 нм = 10<sup>-9</sup> м).

<sup>2</sup> Правда, в том же году инвестиции американских корпораций в нанотехнологические НИР превысили правительственные.

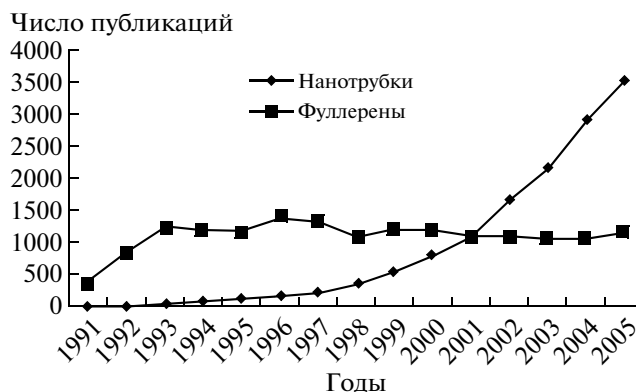


Рис. 1. Общее число публикуемых в мире работ в области нанотрубок и фуллеренов (согласно БД SCI).

цесса. Наноматериалы представляют принципиально новую ступень в этой цепочке. Понимание свойств на наноуровне позволяет проектировать и изготавливать совершенно новые материалы. Нанотехнология, по существу, открывает дверь к эксплуатации практически неисчерпаемой сокровищницы возможных материалов, и задача человечества – разумно этим воспользоваться.

Открытие фуллеренов (новой формы существования молекулярного углерода) в физическом эксперименте стало знаменательным во многих отношениях, в том числе и тем, что стимулировало рост интереса к другим наноматериалам. Исследовательский “фуллереновый бум” привел к открытию углеродных нанотрубок: сначала многослойных в 1991 г. японским ученым С. Ииджимой из NEC Laboratories (Iijima, 1991), затем однослойных в 1993 г. сразу двумя группами исследователей из компаний NEC и IBM (Iijima, Ichihashi, 1993; Bethune, Kiang, de Vries, 1993)<sup>3</sup>. Об истории и предыстории этого открытия рассказано в переводной монографии (Харрис, 2003), о роли в ней российских ученых – в предисловии редактора перевода Л.А. Чернозатонского, а также в (Гуляев, 2003; Жбанов, Сеницын, Торгашов, 2004). По уникальности свойств и перспективам использования УНТ значительно превосходят фуллерены, поэтому сразу же привлекли широкий исследовательский интерес в мире, который стал особенно интенсивным после открытия в 1992 г. метода получения нанотрубок в граммовых количествах.

В силу массовости журнальные публикации наиболее ценны для анализа масштабов, структуры и источников развития исследований. Рост исследований по УНТ проанализируем с помощью библиометрической статистики, полученной из базы данных Science Citation Index (SCI) в варианте Web of Science (1991–2002 гг.) и на CD-дисках (2003–2005 гг.). В результате поиска по ключевым словам, содержащимся в названиях публикаций (статей, писем, обзоров, материалов конференций), было отобрано 12 410 работ<sup>4</sup>. На рис. 1 показан рост ежегодного числа публикаций в мире, посвященных изучению нанотрубок, в сравнении с числом публикаций по фуллеренам. Как видно на рис. 1, начиная с 2002 г. мировой интерес в изучении углеродных наноструктур сместился в пользу УНТ. Свой публикационный вклад в это направление внесли представители 72 стран, расположенных на всех континентах мира. В первую двадчатку по активности публикаций за весь период вошли: США (32.6), Китай (19.3), Япония (16.0), Южная Корея (6.5), Германия (6.0), Франция (5.8), Великобритания (4.7), Россия (3.6), Тайвань (2.5), Бельгия (2.2), Италия (2.1), Испания (2.1), Швейцария (1.8), Индия (1.6), Канада (1.5), Сингапур (1.4), Бразилия (1.2), Израиль (1.2), Австралия (1.2), Венгрия (1.1)<sup>5</sup>.

После первых работ, принадлежащих японцам и россиянам, лидерство по числу публикаций уверенно захватили ученые из США. В последние годы реальную конкуренцию им составляют только представители Китая (рис. 2). Ученые из Южной Кореи опубликовали свои первые работы по УНТ лишь в 1997 г., однако в 2001 г. уже обошли Германию и вышли на четвертое место в

<sup>3</sup> Интересно отметить: если фуллерены были открыты академическими учеными из Сассекского университета (Великобритания) и университета Райса (США), то УНТ – исследователями из крупных промышленных компаний.

<sup>4</sup> Поискное предписание: nanotub\* or buckytub\* or reprod\* or CNT\* or SWNT\* or SWCNT\* or DWNT\* or DWCNT\* or MWNT\* or MWCNT\*. Заметим, что при таком предписании в выборку помимо УНТ попали работы, посвященные нанотрубкам из некоторых неорганических материалов, а также органические нанотрубки (например, protein nanotubes). Однако их доля в процентном отношении невелика.

<sup>5</sup> В скобках указана доля соответствующей страны в общей массе публикаций.

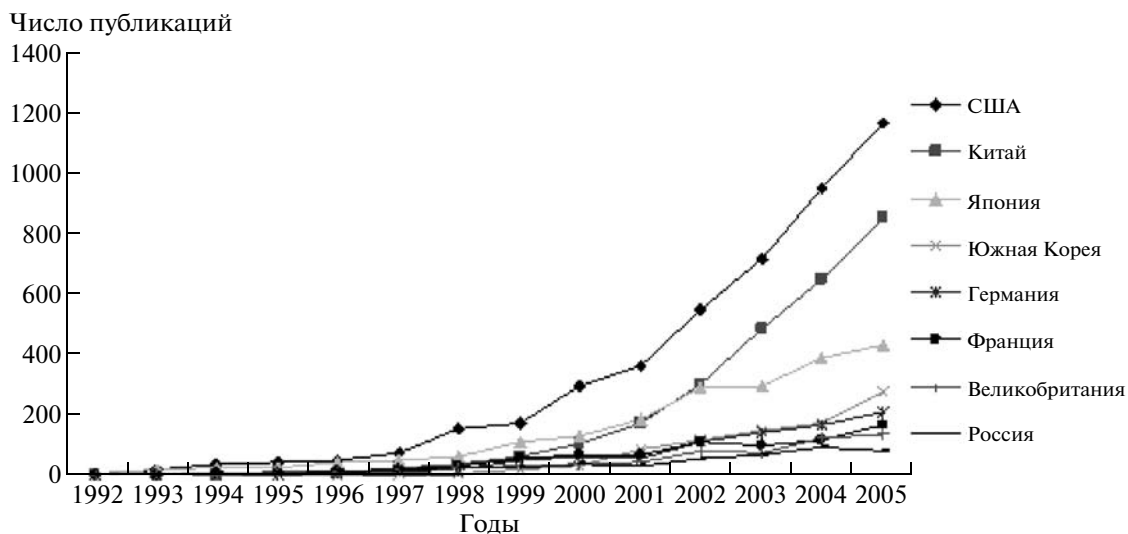


Рис. 2. Число публикаций по нанотрубкам в разных странах.

мире. Россия с 1999 г. по числу ежегодных публикаций занимает не выше восьмого места, однако и здесь нас энергично в последние годы догоняет Тайвань. Таким образом, межстрановой аспект динамики исследований в области фуллеренов (Терехов А.И., Терехов А.А., 2007) и нанотрубок сильно отличается.

Доля публикаций по нанотрубкам, имеющих международное соавторство, уступает аналогичному показателю для фуллеренов (Терехов А.И., Терехов А.А., 2007). Кроме того, интенсивность международного сотрудничества в работах по нанотрубкам демонстрирует тенденцию к снижению: доля соавторских публикаций уменьшилась с 22.2% в 1992–2002 гг. до 18.6% – в 2003–2005 гг. Этот факт может отчасти отражать возрастающее соперничество в данной области. Самая низкая за последние три года наблюдений доля публикаций с международным соавторством у Китая (16.9%) и Тайваня (17.8%). Для России этот показатель составляет 34.3%, для США – 24.8%. Всего на трехгодичном массиве публикаций по нанотрубкам реализовано около 2000 международных соавторских связей, более 35% из них приходится на долю США и более 55% – на долю США, Китая и Японии вместе взятых. Россия имела соавторские связи со всеми опережающими ее по числу публикаций странами, причем наиболее частые – с США (16), Великобританией (12) и Германией (11).

Для 3390 мировых публикаций по нанотрубкам 1992–2001 гг. (БД SCI) доля цитированных к 2003 г. составила 88.8%, а среднее число ссылок на одну процитированную публикацию – 31.6. Для России аналогичные показатели составили 80.2% и 14.5 ссылок соответственно. Характерно, что международное соавторство повышает показатели цитируемости российских публикаций с 78.7 до 83.3% для первого показателя и с 8.7 до 25.2 ссылок – для второго. Доля цитированных публикаций США равна 87.4%, а среднее число ссылок на одну процитированную публикацию – 48.8. Из состава работ, процитированных 100 раз и более, 68.5% приходится на долю США. Далее следуют Япония (16.7%), Франция (8.3%), Голландия (5.5%), Великобритания (5.5%), Швейцария (4.8%). Только одна российская публикация вошла в указанный список. Из 10 наиболее цитируемых публикаций (от 675 до 1400 ссылок) 6 имеют авторство/соавторство ученых из США, 3 – из Голландии, 2 – из Франции и Японии, 1 – из Швейцарии и Бразилии.

Таким образом, США лидируют почти по всем библиометрическим показателям. Они практически первыми перенесли акцент с изучения фуллеренов на УНТ (согласно БД SCI в 2000 г. число публикаций американских ученых по УНТ впервые превысило число публикаций по фуллеренам, а в 2003 г. разрыв был уже в разы). В России подобный маневр был, очевидно, упущен (рис. 3, 4<sup>б</sup>), что сказалось в дальнейшем на ситуации в области изучения и применения УНТ.

Обратимся к патентной статистике. Быстрый поиск в самой крупной базе данных Ведомства по патентам и товарным знакам США (USPTO) показывает, что на 31 июля 2007 г. выдано 569 па-

<sup>б</sup> Для построения графиков были использованы базы данных проектов РФФИ и Национального научного фонда (ННФ) США (см.: [www.nsf.gov/awardsearch](http://www.nsf.gov/awardsearch)).

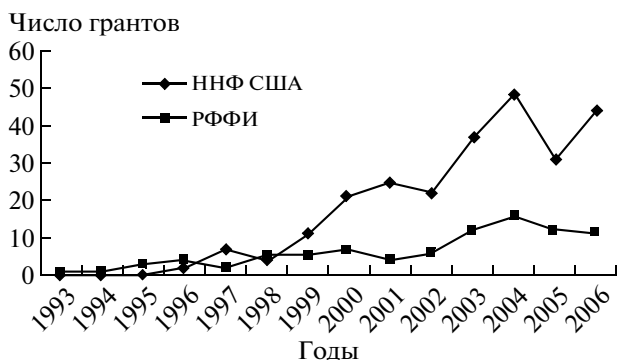


Рис. 3. Число грантов, выданных научными фондами США и России, на исследования в области нанотрубок.

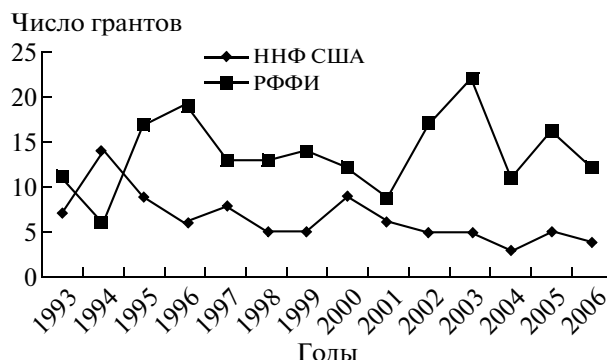


Рис. 4. Число грантов, выданных научными фондами США и России, на исследования в области фуллеренов.

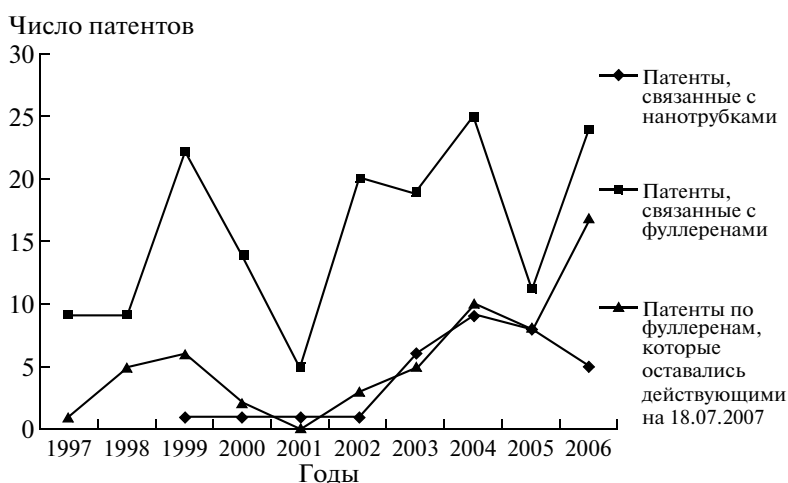


Рис. 5. Динамика выдачи российских патентов на изобретения, связанных с нанотрубками и фуллеренами.

тентов, содержащих термин “carbon nanotube(s)” в реферате и 2499 – в патентной спецификации или описании. Аналогичные данные для опубликованных патентных заявок с 2001 г. по настоящее время: 1478 и 6004 заявок соответственно. По состоянию на 2004 г. из 1259 выданных патентов США и зарегистрированных патентных заявок 28% связаны с получением УНТ, 72% – с их различными применениями. Вторая группа распределена по направлениям, %: электронные устройства (дисплеи с полевой эмиссией, генерация рентгеновского излучения, подсветка ЖК-монитора, лампы) – 37; наноэлектроника – 22; энергетика (топливные элементы, хранилища газа, литиевые вторичные батареи, конденсаторы и т.д.) – 14; нанокompозиты (высокопрочные материалы, электростатическая разрядка, проводящие пленки, экраны и поглотители электромагнитных помех и т.д.) – 13; наномеханотроника (нанозонды, нанопинцеты, нанокапсулы и т.д.) – 8, другие применения – 6. Для сравнения: из 1093 УНТ-патентов, выданных Патентным ведомством Японии за тот же период, 37% связано с получением нанотрубок, а из патентов, связанных с их применениями, 44% относится к электронным устройствам и 30% – к нанокompозитам (Young, 2006). Обладателями ключевых патентов в этой области являются такие компании, как IBM, NEC, Hyperion, Intel, GE, Nantero, Unidym, а также Rice University и Stanford University.

Коммерческий потенциал УНТ чрезвычайно высок, поэтому университеты, правительственные лаборатории, исследовательские подразделения корпораций стремятся установить широкую патентную защиту. К середине 2006 г. в США уже было выдано 446 УНТ-патентов, содержащих 8557 формул изобретения, 420 из которых – блокирующего типа (Berger, 2007). Порождаемые этим юридические неопределенности способны сдерживать инвестиции в массовое

производство продуктов на основе УНТ либо приводит к значительным юридическим и лицензионным издержкам компаний, стремящихся производить такие продукты.

В России – иная ситуация и проблемы. В БД Роспатента найдено всего 32 патента на изобретения, содержащих в названиях или рефератах ключевое слово “нанотруб\*” (звездочка означает усечение слова при поиске). За этот же период патентов, связанных с фуллеренами, было выдано почти в 5 раз больше. Динамика выдачи патентов по годам представлена на рис. 5. Из 32 патентов 10 относится к получению и выделению нанотрубок, причем 2 – неуглеродных: нанотрубок оксида ванадия и нанотрубок из биметаллического слоя титана и золота. Применения УНТ в патентуемых изобретениях связаны: с электроникой (4), биомедициной (4), авиастроением (3), криогенной техникой различного назначения (3), металлургией (2), строительством (2), химическим производством (1), электротехникой (1), нанотехнологическим оборудованием (1), экологией (1). Символично, что среди патентообладателей две японские корпорации (SONY и Simadzu) и две американские компании, одна из которых (Hyperion Catalysis International) относится к ведущим мировым производителям УНТ. Одна заявка (2004 г.) и патент (2007 г.) на способ получения фуллеренов принадлежит Frontier Carbon Corporation (Япония) – ведущему мировому производителю фуллеренов, а также ее партнеру в США – TDA Research, Inc. На фоне большого числа прекративших действие патентов отечественных обладателей ими (рис. 5) это служит некоей оптимистической оценкой перспектив российского рынка углеродных наноматериалов и продуктов на их основе.

## 2. ИННОВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ УНТ: ПРИЛОЖЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ЭКОНОМИКА

УНТ обладают рекордными механическими характеристиками (прочность, жесткость), уникальными тепло- и электропроводностью, оптическими и магнитными свойствами. В зависимости от геометрических параметров они могут иметь металлическую или полупроводниковую проводимость (Харрис, 2003). Подобное сочетание создает для них широчайший потенциал применений: сверхпрочные волокна, пряжа, ткань; композиционные материалы; чипы памяти; логические схемы; наносенсоры; полевые эмиттеры; наноэлектромеханические системы (НЭМС); искусственные мышцы; топливные элементы; хранилища для газов; солнечные батареи; электродный материал ион-литиевых батарей; суперконденсаторы; адсорбенты; биодатчики; средства для внутриклеточной доставки лекарств; материалы для имплантатов и протезов; источники рентгеновского излучения; электромагнитные экраны; материалы оптоэлектроники; материалы для катализа; элементы будущих наномашин (Харрис, 2003; International assessment, 2007). Это отнюдь не полный и далеко не закрытый список возможных применений УНТ.

В качестве примера назовем части автомобиля, где могут быть использованы УНТ: части корпуса; стекла; бамперы и отделка; покрышки колес; система безопасности; батареи; подача топлива; смазка подшипников; очистка выхлопного газа (Zhang Chuan Yi, 2006). В космическом корабле нанотрубки могут найти применение: как высокопрочные и легкие структурные материалы (нанобумага из УНТ); для хранения водородного топлива; в НЭМС; для защиты электроники от радиации; в вычислительных устройствах с возможностью восприятия не только электронных, но и акустических, химических или тепловых сигналов; в сенсорах и сенсорных системах (недавно NASA объявило об успешном испытании на орбите газового сенсора на УНТ) и т.д. Известен также американский проект космического лифта – троса, связывающего Землю с геостационарным спутником (разрабатываемый для этой цели полимер с 60%-ным наполнением УНТ по прочности на разрыв в десятки раз превосходит существующие) (Iannotta, 2006; Edwards, 2003).

**Перспективы.** Нанотрубки стали, пожалуй, самой горячей темой в технике со времен полупроводников. Однако остается вопрос: почему при таком потенциале УНТ он до сих пор не реализован? Существуют два основных барьера на пути продвижения УНТ в приложения: высокие цены и перевод великолепного сочетания свойств УНТ в наномасштабе в структурные свойства на макрошкале. Многие рекордные характеристики относятся к однослойным нанотрубкам (ОУНТ)<sup>7</sup>, стоимость которых может достигать 2000 долл. за 1 г. Несмотря на прогресс, получение качественных нанотрубок все еще остается высокочрезвычайно затратным. Существует много методов произ-

<sup>7</sup> Правда, в последнее время показано, что двухслойные УНТ (ДУНТ) по ряду характеристик могут составить конкуренцию ОУНТ (Раков, 2007а).

водства УНТ<sup>8</sup>, причем каждый производит немного отличающийся материал – по распределению диаметра и длины нанотрубок, их хиральности, чистоте, катализаторам, видам примеси, дефектам и пр. Очистка увеличивает долю нанотрубок в партии, но часто может модифицировать их: открывать концы, уменьшать длину, вызывать дефекты и т.д. Характеризация, в свою очередь, требует электронного микроскопа, различных видов высокотехнологичной спектроскопии. Все это удорожает процесс. Второй барьер обусловлен недостатком научно отработанных технологических приемов, способных обеспечить перевод свойств УНТ в наномасштабе в структурные свойства на макрошкале. Однако методы совершенствуются, и не для всяких приложений требуются высокочистые ОУНТ, часто их могут заменять более дешевые многослойные нанотрубки (МУНТ). По прогнозам одного из ведущих производителей УНТ, компании Shenzhen Nanotech Port Co. (Китай), через несколько лет при производстве, превышающем 10 т в год, ОУНТ и ДУНТ могут стоить 0.5 долл. за 1 г (Zhang Chuan Yi, 2006).

В России производство чистых ОУНТ исчисляется десятками граммов в год (Крестинин, 2007). Этот материал недоступен для многих отечественных научных лабораторий из-за дороговизны и ограничений на внешние поставки (как материал двойного применения), что, очевидно, тормозит исследования и разработку приложений. В Институте проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН) создана перспективная технология производства ОУНТ на основе электродугового процесса (лабораторный вариант), которая при масштабировании позволяет производить чистые ОУНТ по цене около 60–100 долл. за 1 г. Это делает экономически рентабельным их применение в электронике, оптике, производстве топливных элементов (Крестинин, 2007). По разработкам Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (РХТУ) в Тамбове создается опытное производство УНТ (Раков, 2007). Таким образом, наша страна еще далека от промышленного освоения потенциала УНТ. В разработках РХТУ основное внимание уделяется применению УНТ как наполнителей композитов и изготовлению из них макроскопических материалов, включая высокопрочные волокна и структуры на поверхности подложек. В частности, Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ) совместно с ИПХФ РАН разработан метод введения УНТ в полиметилметакрилат (Раков, 2007). ВИАМ запатентовано изобретение, относящееся к полимерным композиционным материалам (с добавлением УНТ), которые используются в элементах конструкций авиационной и космической техники<sup>9</sup>. Коллективом из Московского физико-технического института (МФТИ) разработан световой элемент с катодом на УНТ (Жбанов, Сеницын, Торгашов, 2004). В настоящее время совместно с ФГУ Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ) разрабатывается новый способ изготовления автоэмиссионных катодов из углерод-азотных нановолокон (Бормашов, Лешуков, Шешин и др., 2007).

Пример коммерческого продвижения связан с международной кооперацией. На Четвертой международной конференции по вакуумным источникам электронов (IVeSC'2002), проходившей в Саратове, был показан полноцветный адресуемый дисплей на нанотрубках совместного производства ООО «Волга–Свет» (Саратов, Россия) и CoruTele Inc. (Нью-Йорк, США) (Жбанов, Сеницын, Торгашов, 2004). Разработка дисплея была запатентована в 2003 г. в США совместно американской компанией CoruTele Inc. и ООО «Волга–Свет»<sup>10</sup>. Позднее на нее был выдан российский патент (получатель патента – ФГУП Научно-исследовательский институт «Волга») <sup>11</sup>. В настоящее время разрабатываемые американо-российские дисплеи на УНТ близки к стадии производства. В частности, прошли испытания на надежность дисплеи с диагональю 5.5 дюйма, которые предполагают использовать автопроизводители России в качестве информационного и навигационного оборудования. Поставщиком УНТ выступает азиатская компания. Таким образом, выстроена глобальная стоимостная цепочка от наноматериала до конечного продукта, что, по-видимому, будет характерно для коммерциализации нанотехнологии.

<sup>8</sup> Все методы делятся на две основные группы: 1) возгонки графита (электродуговое испарение, лазерная абляция) – его десублимации и 2) каталитического пиролиза углеводородов. В последние годы интерес к более разнообразным методам из второй группы устойчиво растет (Раков, 2007б).

<sup>9</sup> Патент № 2223988 РФ. Полимерное связующее, композиционный материал на его основе и способ его изготовления / Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Ильченко С.И., Пономарев А.Н., Кривонос В.В., Комарова О.А., Копылов А.Е. 20.02.2004.

<sup>10</sup> Patent № 6614149 US. Field-emission matrix display based on lateral electron reflections / Kastalsky A., Shokhor S., DiSanto F.J., Krusos D.A., Gorfinkel B., Abanshin N. 02.09.2003.

<sup>11</sup> Патент № 2253176 РФ. Катодолюминесцентный матричный экран / Горфинкель Б.И., Русина Е.В., Абаньшин Н.П., Мухина Е.Г., Никишин Н.В., Бурматова И.В. 27.05.2005.

Мировой интерес к коммерциализации нанотехнологий и УНТ отражается, в частности, в большом числе разработанных технологических дорожных карт (ДК), которые являются своеобразным аналогом бизнес-планов и имеют разную степень детализации. Два наиболее крупных проекта нанотехнологических ДК, охватывающих и перспективы применения УНТ (Европейской комиссии и американской консультационной фирмы Lux Research), кратко представлены в Приложении. Применению нанотрубок посвящена внутренняя дорожная карта европейской консультационной и инжиниринговой фирмы Willens & van den Wildenberg (Голландия, Испания) (Вах, Rodriguez, 2004). Согласно этой ДК на 2004 г. наиболее коммерчески продвинуты (до стадии возможного массового производства) проводящие полимеры, на подходе – дисплеи с полевой эмиссией, батареи, микроскопия. На стадии первых приложений или перехода к ним находятся светоизлучающие устройства, устройства рентгеновского излучения, мембраны (включая топливные элементы), суперконденсаторы. Достигли стадии прикладных исследований или близки к ней высокопрочные полимеры, медицинские каркасные системы<sup>12</sup>, материал, экранирующий электромагнитное излучение, сенсоры, интегральные схемы и память. На стадии фундаментальных исследований – усовершенствованные солнечные батареи, хранилища водорода, огнестойкие полимеры, ударно-вязкие керамики, искусственные мышцы и др. В 2008 г. к стадии массового производства приблизились источники рентгеновского излучения, мембраны, суперконденсаторы. В 2014 г. к массовому производству будут готовы также высокопрочные и огнестойкие полимеры, ударно-вязкие керамики, светоизлучающие устройства, сенсоры, медицинские каркасные системы, материал, экранирующий электромагнитное излучение, усовершенствованные солнечные батареи, хранилища водорода, интегральные схемы и память.

Многие достижения нанотехнологии будут внедрены в электронику (различные электронные устройства, например дисплеи, сенсоры), а также нанoeлектронику, поэтому остановимся на данном направлении подробнее. Поскольку нанотрубки ведут себя как проводники или полупроводники, они чрезвычайно полезны для приложений в наномасштабной электронике. Можно представить полностью основанную на углероде нанoeлектронную технологию, при которой электропроводка состоит из металлических УНТ, а активные устройства изготовлены из полупроводниковых УНТ. Уже были продемонстрированы различные базисные электронные компоненты, включая полевые и одноэлектронные транзисторы, выпрямляющие диоды, малые логические схемы, инверторы и ячейки памяти. Хотя в настоящее время можно построить наносхему, включающую провода, электронные ключи и элементы памяти, полностью сделанные из нанотрубок и других молекул, все же для регулярного изготовления основанных на УНТ интегральных схем необходим еще значительный прогресс.

Нанoeлектроника – одна из ключевых областей для правительственного финансирования, промышленных инвестиций и венчурного капитала. По данным Ассоциации производителей оборудования для полупроводниковой промышленности (SEMI), доля нанoeлектроники на мировом рынке электронной продукции должна вырасти с 18% в 2005 г. до 48% в 2010 г. (Sheet, 2006; Editorials, 2006). К коммерческим нанoeлектронным продуктам относятся: полупроводники ( $\leq 90$  нм); память на жестких дисках (с перпендикулярной записью и т.д.); органические светодиоды; альтернативные формы памяти (с ферроэлектрической, магниторезистивной, а также УНТ-технологиями производства); сенсоры на основе УНТ; наконечники атомных силовых микроскопов. Ожидается, что в последующие несколько лет будет коммерциализовано производство: дисплеев с полевой эмиссией; блоков светодиодной подсветки на основе УНТ, пленки; термического контактного материала (возможно, на основе УНТ), а также, вероятно, наномеханическая память. По оценке упомянутой организации, на рынке наноматериалов для нанoeлектроники УНТ и фуллерены будут в 2010 г. на третьем месте (после сконструированных молекул и покрытий) с долей рынка около 9%. В своей дорожной карте по применению УНТ в электронике мюнхенская консультационная компания Wicht Technologie Consulting (WTC) подтверждает начало коммерциализации сенсоров, а к 2010 г. – памяти на основе УНТ (с энергонезависимостью, высокой скоростью передачи данных и плотностью записи информации, полной масштабируемостью и другими возможностями) (Naan, 2007). Далее могут последовать вертикальные межсоединения и радиочастотные переключатели (2015–2020 гг.), затем – горизонтальные межсоединения и транзисторы (после 2020 г.).

<sup>12</sup>Могут применяться в восстановительной медицине, например при выращивании нейронного имплантата (при лечении инсульта) или кровеносного сосуда (при лечении заболеваний сердца) из стволовой клетки.

Представляют интерес также разработки и бизнес-планы конкретных компаний, ближе стоящих к производству. Так, согласно заявлению руководства компании Nantero<sup>13</sup>, первая компьютерная память на основе УНТ должна быть выпущена на рынок уже в конце 2007 г. по сопоставимым с конкурирующими вариантами ценам. Помимо энергонезависимости, высокой скорости чтения/записи и более низкого энергопотребления к достоинствам памяти относится возможность массового производства чипов на традиционном оборудовании. В индустрии процессоров активно ведется поиск способов, позволяющих продлить действие закона Мура, в частности, на основе новых материалов, замещающих кремний. Компании IBM и Intel являются крупнейшими спонсорами исследований, направленных на раскрытие потенциальных возможностей электроники УНТ. Специалисты IBM в 2006 г. создали кольцевой генератор на основе одной нанотрубки, который является прекрасным средством для изучения характеристик углеродных электронных элементов. В Intel разработан прототип чипа, где в качестве межсоединений используются УНТ. Японская корпорация NEC создала технологию, позволяющую стабильно выращивать УНТ и изготавливать транзисторы на их основе. В NEC считают, что смогут разработать процесс производства для реализации УНТ-транзисторов к 2010 г. Американская компания Motorola недавно сообщила, что ее разработки основанных на УНТ дисплеев с полевой эмиссией практически готовы из исследовательской лаборатории перейти в стадию серийного производства, для чего две азиатские компании уже строят производственные мощности. Однако рыночную конкуренцию ей может составить южно-корейская компания Samsung Electronics, которая планирует начать поставки первых плоскочелюстных дисплеев на УНТ к концу 2007 г. Аналогичные разработки осуществляют также японские компании Toshiba и Canon (“Углеродное” будущее электроники, 2007).

Для приложений в электронике, как правило, необходимы высококачественные чистые и, следовательно, дорогостоящие нанотрубки, однако это не создает больших ценовых проблем, так как требуемые количества относительно малы. Более существенной проблемой является неразвитость каналов поставок, поэтому качество поставляемых нанотрубок может колебаться даже у одного поставщика. По мнению пользователей, занимающихся приложениями УНТ в электронике, поставщиков, устойчиво поддерживающих качество и надежность, немного (примерно шесть: по два в США, Европе и Японии). В последнее время положение начало улучшаться, особенно в связи с приходом на этот рынок крупных химических компаний, обладающих отлаженными системами контроля (Editorials, 2006). Еще одним признаком налаживания цивилизованных рыночных институтов в этой сфере является разработка наноэлектронных стандартов. В 2003 г. Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE) выступил с инициативой создания дорожной карты стандартов в наноэлектронике, которая устанавливает порядок разработки стандартов. Такая карта помогла бы коммерческому освоению приложений нанотехнологии в электронике (IEEE invites, 2007). Показательно, что первым (с подачи США) был принят стандарт IEEE 1650 “Стандартные методы испытания для измерения электрических свойств углеродных нанотрубок”. Это – первый в своем роде документ, который дает общий образец для генерации воспроизводимых электрических данных в отношении нанотрубок. По заявлению IEEE, мировые организации уже регулируют в соответствии с ним свои методы описания и регистрации характеристик. В процессе разработки находится второй стандарт IEEE P1690 “Стандартные методы для определения характеристик углеродных нанотрубок, применяемых в качестве добавок в объемные материалы”. В 2007 г. предусмотрен выпуск пяти наноэлектронных стандартов, два из которых для наноустройств, включающих наномасштабные сенсоры и эмитирующие устройства.

Можно назвать и другие перспективные отрасли для применения УНТ, известных своими способностями улавливать глубокие макроэкономические и научно-технические тренды. По данным Американской ассоциации производителей композитов (American Composites Manufacturers Association), Бюро экономического анализа (U.S. Bureau of Economic Analysis), Американского института чугуна и стали (American Iron and Steel Institute) (цитируемым в (Wood, 2006)) с 1960 по 2004 г. производство композитов в США увеличилось в 16 раз, тогда как ВВП вырос в 3, выпуск алюминия в 4, а стали – в 2 раза. Растет использование углеродных композитов для производства: пассажирских (компания Boeing, США) и военных самолетов; военных судов с применением технологии “Стэлс” (компания Kockums, Швеция); баллистических ракет (Китай);

<sup>13</sup>Малая наукоемкая нанотехнологическая компания, использующая УНТ для разработки полупроводниковых устройств следующего поколения, расположена в американском штате Массачусетс. Среди партнеров по проекту создания памяти – BAE Systems – крупная международная компания в области оборонных и аэрокосмических систем и LSI Logic Corporation – лидер на рынке памяти и сетевых решений.





**Рис. 6.** Динамика мировых инвестиций в исследования и разработки в области нанотехнологии.  
Источники: Roco, 2005; Mamikunian, 2007.

лопастей воздушных винтов в установках ветровой энергетики (Европейский мегапроект) и т.д. Ученые работают над созданием композитных материалов, представляющих собой полимеры с добавлением УНТ. При успешном решении проблемы сопряжения поверхностей полимера и нанотрубки, обеспечивающего эффективную передачу нагрузки от полимерной матрицы к нанотрубке, будут получены материалы, которые, сочетая пластичность и низкую стоимость полимеров с хорошей электропроводностью и высокой прочностью УНТ, окажутся уникальным средством для решения многих экономических задач (Елецкий, 2007).

Инженеры NASA утверждают, что применение углеродных нанотрубок революционизирует космические транспортные средства. Они выделяют по меньшей мере восемь важнейших систем будущих транспортных средств, при создании которых могут использоваться УНТ (The right stuff, 2002). О многочисленных военных приложениях говорится в обзоре (Бочаров, Иванов, Мальцев, 2007).

УНТ и продукты на их основе должны стать важной частью мирового нанотехнологического рынка, поэтому приведем некоторые характеризующие его оценки и тенденции. Первая попытка оценить перспективный нанотехнологический рынок была сделана специалистами Национального научного фонда США (ННФ США) в 2001 г.: 1 трлн долл. в год к 2015 г. Многим эта оценка показалась тогда завышенной. Однако позже воздействие нанотехнологии на глобальный экономический выход было оценено еще выше: 1 трлн долл. уже в 2010 г. (инвестиционный банк Evolution Capital); 2.6 трлн. долл. в 2014 г. (консультационная фирма Lux Research)<sup>14</sup>. Подобно распространению электричества, нанотехнология имеет общецелевую направленность, однако не менее 80% ее воздействия на экономику будет реализовано, как считают эксперты, в трех укрупненных секторах: нанoeлектронике, нанобиотехнологии и нанoэнергетике. Основными движущими силами будут выступать три мегатренда: усовершенствование мобильной электроники, старение населения в развитых странах и энергетический кризис (Gasman, 2006).

На рис. 6 показана динамика мировых инвестиций в исследования и разработки в области нанотехнологии, осуществляемых правительствами, корпорациями и венчурным капиталом. Область государственных инвестиций — долговременные исследования, частных — прикладные НИР начальной стадии.

Венчурный капитал по идее призван сыграть решающую роль в переводе нанотехнологии из лабораторий на рынок, однако его доля в общих инвестициях остается низкой (5.2% в 2007 г.). Вложения венчурного капитала в нанотехнологию составили в 2007 г. всего 1.8% (в 2005 г. — 2%) его мировых объемов. Несмотря на рекламный ажиотаж вокруг нанотехнологии (число употреблений одного только этого слова в популярной прессе, по данным Lux Research, растет экспо-

<sup>14</sup>Заметим, что приведенные оценки, помимо прочего, могут зависеть от используемого определения нанотехнологии. Например, определение, принятое в Национальной нанотехнологической инициативе США, исключает микроэлектромеханические системы (МЭМС) или микроэлектронику.

ненциально), поведение мирового венчурного капитала в отношении нанотехнологии весьма сдержанно. Отметим, что в Силиконовой долине в 1990-е годы венчурный капитал занимал активную позицию. Множественные приложения, зависимость от научной инновации, отсутствие на начальном этапе исторической статистики об успехах и неудачах, невозможность зачастую без специальных знаний правильно распознать нанотехнологию порождают серьезную неопределенность для инвесторов. Отсутствие стандартов, регулирующих норм, достоверной информации о рисках для окружающей среды, здоровья, безопасности также может быть барьером на пути нанотехнологии (в том числе продуктов на основе УНТ) к рынку, поскольку компании не могут гарантировать населению и своим работникам полную безопасность их продуктов. По оценке известной консультационной фирмы Frost & Sullivan (США), динамика доходов нанотехнологических компаний в 1996–2004 гг. была противоречивой (Nanotechnology, 2005).

Еще одно препятствие связано с так называемыми “патентными дебрями”. Сложившаяся в США ситуация для нанотрубок столь остра, что предлагается учредить форум по УНТ-патентам, который мог бы облегчить заинтересованным компаниям навигацию по запутанному патентному ландшафту. В том числе необходимостью его консолидации обусловлено и слияние в 2007 г. известного производителя УНТ Carbon Nanotechnologies Incorporated с дочерней структурой Argowhead Research Corporation. Возникшая в результате первая “вертикально интегрированная” компания Unidym была способна производить УНТ и применять их в электронике (Choi, 2007). Защита интеллектуальной собственности в области нанотехнологий представляет проблему и в отдаленной перспективе, поскольку она обеспечивает широкий диапазон материалов и производственных платформ, что, в свою очередь, предполагает возможность достижения целевых характеристик нанопродукта (например, энергонезависимой компьютерной памяти высокой емкости) разными путями. Оба указанных обстоятельства могут сказаться на модели ведения нанобизнеса, снижая в ней вес ИС (Gasman, 2006).

В настоящее время на мировом нанотехнологическом рынке доминируют наноматериалы, причем нанотрубки представляют наиболее быстро растущий их сегмент: до 2011 г. ежегодный рост объема продаж УНТ прогнозируется в среднем на уровне 73.8%. Суммарная производительность установленных в мире мощностей оценивалась на 2006 г. примерно в 270 т в год для МУНТ и около 7 т в год для ОУНТ. Наибольшие производственные мощности сконцентрированы в Азии, далее следуют Северная Америка и Европа (Blackmon, 2006). В настоящий момент в мире имеется свыше 100 производителей УНТ, большинство из которых – университетские лаборатории, производящие нанотрубки для собственных исследований. Среди компаний, производящих нанотрубки на продажу, наиболее известны следующие: Carbon Nanotech Research Institute (Япония), Hyperion Catalysis International (США), ILJIN (Южная Корея), Nanocyl S.A. (Бельгия), Nanoledge (Франция), Rosetter Holdings (Кипр), Shenzen Nanotech Port Co (Китай), Showa Denko (Япония), Sun Nanotech (Китай), Thomas Swan (Великобритания), Unidym (США). Комбинированный тип производителей представляют, например, такие компании, как Motorola Labs, IBM. Заметим, что спрос и реальное производство пока серьезно уступают потенциальным возможностям. Согласно докладу аналитической компании ВСС Research (США) глобальный рынок УНТ составил в 2006 г. 50.9 млн. долл., к концу 2007 г. он достиг 79.1 млн. долл. (что соответствует 2–3 т продукта), а в 2011 г. по прогнозу будет равен 807.3 млн. долл. (ВСС report, 2007). По объемам продаж УНТ значительно превосходят фуллерены: 81.5% продаж приходится в настоящее время на сектор композитов, 7.7% – на сектор электроники и всего 0.3% – на энергетический сектор. В 2011 г. картина должна измениться: композиты по-прежнему будут преобладать, хотя их доля в объеме продаж УНТ снизится до 55.9%; электроника повысит свою долю до 36.2, а энергетика до 6.6%. В приведенных расчетах не выделена нанобиотехнология. Отметим, что прогнозные оценки подобного рода сложны из-за необходимости учитывать множество факторов, в том числе: зависимость от дополняющих продуктов (например, телевизоров или других форм дисплеев); конкуренцию со стороны продуктов-заменителей (например, кремниевых нанопроводов или иных, чем основанные на УНТ, типов дисплеев); фазу общеэкономического цикла (так, при подъеме рынка телевизоры заменяются быстрее, чем при его спаде) и т.д.

Поскольку нанотрубки отнесены к приоритетному направлению при создании отечественной nanoиндустрии, ей предстоит решать многие из тех же технологических, производственно-экономических и инфраструктурных задач. Учитывая стратегический характер данного вида наноматериала, необходимо наладить его массовое производство в России и в первую очередь обеспечить качественными нанотрубками научно-исследовательский сектор. Ведь подобно информационным технологиям именно научные прорывы в нанотехнологии создают предложения, которые трансформируются затем в благоприятные возможности для экономиче-

ского развития (кто, например, еще 10–15 лет назад мог думать о сотовых телефонах или домашнем Интернете?).

По мере развития нанотехнологии и раскрытия ее возможностей и вызовов расширяется круг аналитических и управленческих задач, для решения которых необходим адекватный методологический инструментарий. Реализуемые и возможные направления его формирования обсуждаются в следующем разделе.

### 3. О МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Первая попытка дать коллективную прогностическую оценку результатов развития и социального воздействия нанотехнологии на ближайшие десятилетия была сделана на специальном семинаре “Социальные последствия наноауки и нанотехнологии”, проведенном в США в 2000 г. (Roco, Vainbridge, 2001). На нем же была отмечена важность комплексных междисциплинарных естественно-научных и социально-экономических исследований этого многогранного явления. В этой связи полезен хотя бы краткий очерк методов, позволяющих комплексно подойти к изучению процессов развития нанотехнологии.

Как показали уже первые работы (Braun, Schubert, Zsindely, 1997; Meyer, Persson, 1998), значительный вклад в создание объективной картины развития нанотехнологии способны дать наукометрические исследования. Наличие современных баз данных, в принципе, позволяет, применяя средства информационного анализа и наукометрии, оперативно сформировать вполне целостное и структурированное представление о состоянии и перспективах развития конкретного научного направления, его прикладном потенциале. Расчет библиометрических показателей, формализованный (лингвостатистический) анализ текстовых массивов усиливают и дополняют экспертные оценки при выработке решений. Анализ патентной информации позволяет изучать динамику изобретательской активности, связь патентуемых результатов с проводимыми исследованиями, а также структуру формируемой интеллектуальной собственности и основные направления коммерциализации нанотехнологических инноваций. Количество уже выполненных наукометрических исследований, посвященных нанотехнологии, и их постоянный приток столь велики, что заслуживают отдельного анализа. Наряду с библиометрической статистикой и патентными данными весьма полезным источником информации для количественного анализа становятся исследовательские проекты, финансируемые научными фондами (Терехов, 2007). Причем они важны не только с точки зрения оценки достижений научных групп и организаций, анализа географической структуры науки, схем кооперации, но и с точки зрения содержания – как источник информации для отслеживания момента появления и динамики новых научных тематик, технологического форсайта. Учетные данные об участниках проектов позволяют рассчитать численность, структурные характеристики исследовательских кадров. Эти данные используются для оценки перспектив развития научной области или ее отдельного направления (Терехов, 2007).

Полезным и весьма распространенным методом активного прогнозирования в сфере нанотехнологий становится форсайт. В настоящей статье приводится ряд технологических дорожных карт, построенных согласно этому методу. В России начаты работы по подготовке Национальной программы форсайта в сфере нанотехнологии (Российский НИИ экономики, политики и права в научно-технической сфере), вышла книга на эту тему (Нанотехнологии, 2006). В основе метода форсайт лежат, как известно, экспертные оценки (метод Дельфи, сценарный анализ и др.). Однако их часто недостаточно для предвидения, особенно в таких сложных областях, как нанотехнология, с ее междисциплинарностью, высокими темпами развития, многовариантностью приложений и т.д. Понятно, что форсайт перспектив конкретного направления не много дает без точного расчета будущего обеспечения квалифицированными кадрами, а высокий темп появления новых тематик (которые необходимо отслеживать, например, путем формализованного анализа контента специализированных полнотекстовых массивов) способен быстро изменять картину будущего. К достоинствам количественных (формализованных) методов относятся (несмотря на упрощения) объективность и высокая сопоставимость результатов. Таким образом, комплексная методология должна в идеале сочетать качественные подходы (базирующиеся на экспертных суждениях) с количественными (расчетом наукометрических показателей, кластерным анализом, а в перспективе – с математическими и компьютерными моделями). Возможность такого сочетания дают, например, многокритериальные методы (Терехов, 1995), которые часто применяются в процедурах формирования портфеля проектов (Liesio, Mild, Salo, 2007).

По мере экономического освоения нанотехнологии растущее значение будут получать методы экономического и экономико-математического анализа. Аналитической основой изучения экономических аспектов нанотехнологии должна стать стоимостная цепочка, которую можно составить из трех звеньев: **наноматериалы** (наномасштабные структуры в необработанном виде), **промежуточные нанопродукты** (полуфабрикаты с наномасштабными свойствами), **продукты на основе нанотехнологии** (конечные товары, включающие нанотехнологию). Анализ на основе цепочек формирования стоимости позволил специалистам из Lux Research более точно оценить коммерческий потенциал нанотехнологии. Им удалось показать, что инвесторам выгоднее сосредоточить внимание на приложениях, находящихся в средней части таких цепей, – именно они оказываются потенциально наиболее прибыльными и т.д. (Statement of Findings, 2005). Данная методология в настоящее время развивается с учетом глобального характера нанотехнологических цепочек стоимости (см. пример с плоскопанельными дисплеями на основе УНТ в предыдущем разделе).

В инвестиционных проектах в сфере нанотехнологии велика роль исследований и разработок. Первоначальные инвестиции в НИР высоконеопределенны и имеют стратегический характер. Традиционные методы дисконтированного денежного потока (например, чистой приведенной стоимости) приводят, как правило, к недооценке таких инвестиций с существенными последствиями для ранжирования и отбора проектов. В данной ситуации лучше работает опционный подход. Это подтверждает, в частности, распространенная практика опционных контрактов на проведение исследований и разработок между крупными компаниями и молодыми наукоемкими фирмами для коммерциализации продуктов на базе углеродных наноматериалов. Однако при оценке инвестиций в НИР с позиции реальных опционов возникает ряд принципиальных трудностей. Во-первых, базовый актив (ценность проекта) может изменяться лишь в дискретные моменты времени в отличие от цены на акции. Кроме того, если в исследованиях преобладает фундаментальная составляющая (что не редкость для нанотехнологии), априори не исключена вероятность вообще нулевого результата. Разработка адекватных моделей оценки вложенных реальных опционов способствовала бы устранению искажений при оценивании инвестиций в нанотехнологические проекты, в частности повышала бы вес стратегических инвестиций с высокой степенью неопределенности. К сказанному добавим: форсайт нужен, когда имеется неопределенность, но как раз в этих случаях эффективен и опционный подход. Выявление и оценка реального опциона есть, по существу, построение числовой меры (в стоимостной форме) инвестиционного решения с учетом будущих неопределенностей как технологического, так и рыночного характера. При определенном уровне неопределенности (Tegart, Johnson, 2004) оценка опционов может быть полезным инструментом в процессе форсайта.

Складывающуюся в нанотехнологии ситуацию все чаще характеризуют как гонку, когда фирмы (или государства) инвестируют в НИР с тем, чтобы опередив соперников, занять монопольное положение на открывающихся рынках. Часто новички вступают в борьбу с доминирующей фирмой, стремясь вытеснить ее за счет радикальной технологической инновации, в разработку которой они вкладывают инвестиции. Соперничество может иметь международный аспект, и тогда в него могут включиться правительства стран, резидентами которых являются конкурирующие фирмы. Стратегии фирм – скрытые и текущие расходы на исследования и разработки, стратегии правительств – субсидии, налоги или стандарты. Такая и подобные ей конкурентные ситуации вполне реальны для нанотехнологии, а активная стандартизация, как мы видели на примере наноэлектроники, уже началась<sup>15</sup>. Традиционный экономико-математический аппарат эффективен при анализе экономической конкуренции (по Вальрасу), однако он не вполне приспособлен для исследования конкурентных отношений в сфере исследований и разработок из-за их высокой неопределенности и побочных эффектов. Для этих случаев требуется адаптация и развитие специального класса математических моделей (Терехов, 2003).

Конечно, комплекс методов для многоаспектного анализа процессов развития нанотехнологии (а сюда должны входить также правовые, экологические, этические и другие аспекты) не может быть построен сразу в завершенном виде, однако эта задача является актуальной. В настоящем очерке рассмотрены лишь некоторые из возможных шагов в этом направлении. Подчеркнута важность количественных (формализованных) методов и подходов, целесообразность их сочетания с качественными (экспертными) методами.

<sup>15</sup>Здесь уместно заметить, что американское правительство часто использует упреждающие стандарты для улучшения стратегического положения своих фирм при международном соперничестве в сфере НИОКР (см. (Терехов, 2003)).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на некоторые потенциальные риски для здоровья людей и экологии (эти проблемы остаются предметом дискуссий), правительства многих стран, особенно развитых, уверены, что наноиндустрия может стать одним из важных факторов экономического роста. По мнению европейских политиков, нанонаука и нанотехнология являются ключевыми для построения экономики и общества, основанных на знании, в Европейском союзе. Подобно распространению электричества на рубеже XIX в. или микроэлектроники в последней четверти XX в. нанотехнология имеет общецелевой характер: не являясь отдельной отраслью или единым рынком, она будет воздействовать буквально на каждый рыночный сегмент, усовершенствуя традиционные продукты и создавая новые.

Производство потенциальных нанотехнологических инноваций определяют три главных фактора:

- 1) достижения в получении нового научного знания;
- 2) способность коммерциализовать эти достижения;
- 3) доступность капитала для реализации факторов 1 и 2.

На развитие нанотехнологии в России выделено крупное финансирование, однако капитал требуется в физической форме. Так, для производства нового научного знания нужны хорошо оснащенные лаборатории, квалифицированные кадры исследователей. Если приборы и оборудование можно, например, купить за рубежом, то обучение и подготовка квалифицированных кадров, учитывая предыдущие потери России (Терехов, 2007), потребуют длительных усилий. Несмотря на значительные одномоментно выделенные средства, отсутствие аккумулированных инвестиций, в том числе в инфраструктуру, еще долго будет негативно влиять на соотношение “затраты – выход”<sup>16</sup>.

Нанотехнология – яркий представитель макроинноваций, инициированных наукой. Расширение финансирования исследований повышает их продуктивность (число публикаций), что сказывается на количестве патентуемых результатов и приводит к расширению инновационных возможностей. Производство нового знания способно также обеспечивать ключевые технические решения и для основных барьеров коммерциализации. Сказанное иллюстрирует пример двух родственных углеродных наноструктур. По количеству выполняемых исследовательских проектов (БД РФФИ), оценке публикационного вклада России (БД SCI), числу запатентованных изобретений (БД Роспатента) фуллерены превосходят УНТ. В значительной степени это результат целевой государственной поддержки<sup>17</sup>, благодаря которой удалось создать национальное сообщество исследователей, интегрированное в мировое “фуллереновое” сообщество, добиться ряда первоклассных результатов, в том числе превосходящих мировой уровень. Некоторые из них были превращены затем в защищенные патентами технологии. Даже при отсутствии промышленной базы для реализации экономического потенциала фуллеренов принципиальная возможность ее создания не упущена. Таким образом, первоначальные инвестиции государства в исследования создали своеобразный опцион на продолжение участия России в мировом “фуллереновом проекте”. К сожалению, мы пропустили момент, когда интересы мирового научного сообщества сместились в пользу более перспективных УНТ. Недостаточное финансирование фундаментальных исследований сказалось на научном рейтинге России в одном из ключевых направлений (восьмое место по сравнению с третьим в фуллеренах), ухудшило возможность восприятия и обмена передовыми научными результатами с лидирующими странами (снизился уровень представительства россиян на международных конференциях). Это положение сдерживает участие российских ученых в поиске более экономичных способов массового производства УНТ. И это в то время, когда многими странами нанотрубки включены в число приоритетных направлений развития наноиндустрии, а мировой рынок УНТ и продуктов на их основе по ряду признаков движется к разрешению проблемы “яйца и курицы”<sup>18</sup>. Учитывая ведущую роль науки, а также то обстоятельство, что инновационный процесс, особенно для технологий “снизу вверх”, не линеен, с взаимными обратными связями между нанонаукой и нанотехнологией, ка-

<sup>16</sup>Если совокупные мировые инвестиции в нанотехнологию и объем продаж продукции, произведенной с ее использованием, соотносились в 2007 г. примерно как 1 : 5, то в России это соотношение составляло 1 : 1.5.

<sup>17</sup>В 1993 г. в рамках ГНТП “Актуальные направления в физике конденсированных сред” было сформировано программное направление “Фуллерены и атомные кластеры”.

<sup>18</sup>Компаниям, способным производить коммерческие продукты, требуется стабильная поставка нанотрубок высокого качества в достаточном объеме, а поставщики, в свою очередь, должны ощущать достаточно емкий рынок, прежде чем инвестировать в оборудование для массового производства УНТ.

жется нелогичным, что ГК “Роснано” лишена права выделять деньги на фундаментальные исследования. В результате разрыва инновационного цикла эффективность деятельности государственной корпорации может быть снижена, а многие из перспективных идей не будут доведены до рыночного продукта.

Несмотря на продолжающуюся эйфорию, происходит осознание, что процесс коммерциализации нанотехнологии, по крайней мере в ее магистральных направлениях, не будет быстрым. Пример углеродных наноструктур тому подтверждение. Уместно также напомнить: для полной коммерциализации различных продуктов на основе МЭМС потребовалось от 14 до 36 лет (Grace, 2006). Так что расчет на “низко висящие яблочки” здесь не проходит. Важность нанотехнологии для отраслей производства в том, что она становится для них элементом трансформирования в экономику знаний, построение которой как раз входит в долговременный курс нашей страны.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Наиболее масштабный проект Европейской Комиссии NanoRoadMap Project рассчитан на десятилетний период (2004–2014 гг.); в нем участвует около 350 экспертов, в качестве основной процедуры использован метод Дельфи (Roadmaps, 2006). Разработано 12 технологических ДК, сгруппированных по трем секторам: 1) материалы; 2) здоровье и медицинские системы; 3) энергетика. Для примера рассмотрим третий. Четыре ДК в энергетическом секторе посвящены: солнечным батареям; термоэлектричеству; перезаряжаемым батареям и суперконденсаторам; теплоизоляции и теплопроводности.

В первом энергетическом подсекторе УНТ, как и фуллерены, не являются лидерами и, как ожидается, пройдя стадии фундаментальных и прикладных исследований, к 2014 г. выйдут лишь в число первых приложений. В плане коммерциализации они далеко позади тонких пленок и батарей на основе красителей и электролитов. Возрастающе важную роль в предстоящее десятилетие нанотехнология будет играть в термоэлектричестве, главным образом через разработку и применение новых материалов, включая тонкие пленки, наночастицы, нанокристаллические материалы, сверхрешетки. Нанотрубки не найдут сколь-либо значимого применения в этом энергетическом подсекторе. Перезаряжаемые батареи и суперконденсаторы – портативные источники энергии, применяемые в мобильных телефонах и портативных компьютерах; их сопряжение с солнечными батареями или ветряными генераторами может стать вариантом возобновляемой энергетики. Признано, что нанотехнология предлагает решения для многих проблем, относящихся к разработке этих источников энергии, поэтому выполняемые в настоящее время исследования находятся на более продвинутой стадии по сравнению с другими областями энергетики. Ожидается, что нанотехнология будет играть важную роль на рынке батарей и суперконденсаторов уже к 2009 г., с дальнейшим усилением позиций к 2014 г. Рынок “с пониманием” воспримет даже значительный рост издержек ввиду повышения эксплуатационных характеристик предлагаемых нанопродуктов. Прогресс возможен в нескольких направлениях (увеличение плотности энергии и мощности, повышение коэффициента зарядки/разрядки и др.), для чего потребуются сосредоточить внимание на разработке электродов и в меньшей степени – электролитов. Наиболее вероятными лидерами при разработке электродных материалов, по мнению экспертов, будут нанокompозиты и наночастицы, за которыми следуют тонкие пленки, УНТ и нанопровода. В последнем энергетическом подсекторе нанотехнология, как ожидается, будет играть важную роль уже к 2009 г. Исследования и разработки в области тонких пленок и наночастиц приведут к практическим приложениям (сверхтвердые материалы, переключаемые покрытия для глазурования), которые к 2014 г. могут достигнуть массового производства. УНТ будут привлекать исследовательский интерес и к 2014 г. могут достигнуть первых приложений, главным образом в связи с улучшенной теплопроводностью и “умным” глазурованием.

Представленные дорожные карты отражают преимущественно европейский взгляд на развитие ситуации. Расхождения в оценках, содержащихся в разных ДК, возможны в результате субъективных факторов.

Согласно продуктовой ДК консультационной фирмы Lux Research из Нью-Йорка среди конечных продуктов, включающих нанотехнологии, с долей в продуктовом сегменте более 10% к 2009 г. окажутся только компьютеры и самолеты, а среди промежуточных – топливные элементы, встроенные дисплеи, логические чипы и чипы памяти (Nordan, 2005). К 2014 г. к первой группе по прогнозу добавятся: потребительская электроника, спортивные товары, бытовая техника, автомобили, зубоорудование, медицинские инструменты, медикаменты и т.д., а ко второй – нанокompозиционные покрытия, солнечные батареи, устройства памяти, компоненты

оптики, ортопедические материалы, биологические маркеры и др. Во многих из перечисленных продуктов используются УНТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бормашов В.С., Лешуков М.Ю., Шешин Е.П. и др.** (2007): Новый метод изготовления автокатодов из углерод-азотных нановолокон // *Нано- и микросистемная техника*. № 1.
- Бочаров Л.Ю., Иванов А.А., Мальцев П.П.** (2007): О зарубежных программах по военной нанотехнологии. Часть 2 // *Нано- и микросистемная техника*. № 1.
- Гуляев Ю.В.** (2003): Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники // *Вестник РАН*. Т. 73. № 5.
- Елецкий А.В.** (2007): Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // *Успехи физических наук*. Т. 177. № 3.
- Жбанов А.И., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В.** (2004): Устройства нанoeлектроники на основе углеродных нанотрубок // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. Т. 47. № 5–6.
- Крестинин А.В.** (2007): Проблемы и перспективы развития индустрии углеродных нанотрубок в России // *Российские нанотехнологии*. Т. 2. № 5–6.
- Нанотехнологии** (2006): *Нанотехнологии: Форсайт* / Под ред. Н.В. Гапоненко. Центр исследований проблем развития науки РАН. М.: Современная экономика и право.
- Раков Э.Г.** (2007а): Волокна с углеродными нанотрубками // *Рынок легкой промышленности*. № 48.
- Раков Э.Г.** (2007б): Получение тонких углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом // *Успехи химии*. Т. 76. № 1.
- Терехов А.И.** (1995): Многокритериальные методы планирования крупномасштабных кадровых систем (обзор) // *Экономика и мат. методы*. Т. 31. Вып. 4.
- Терехов А.И.** (2003): Математические модели соперничества в сфере НИОКР // *Математическое моделирование*. Т. 15. № 4.
- Терехов А.И.** (2007): О формировании научной базы нанотехнологии: опыт наукометрического анализа с использованием исследовательских проектов // *Российские нанотехнологии*. Т. 2. № 11–12.
- Терехов А.И., Терехов А.А.** (2007): Наукометрический анализ направления “Индустрия наносистем и материалы” (на примере материалов) // *Экономическая наука современной России*. № 4 (39).
- “Углеродное” будущее электроники (2007): “Углеродное” будущее электроники: Последние достижения. [Http://www.ixbt.com/editorial/carbon.shtml](http://www.ixbt.com/editorial/carbon.shtml).
- Харрис П.** (2003): Углеродные нанотрубы и родственные структуры. М.: Техносфера.
- Вах L., Rodriguez J.P.** (2004): Sectoral Report: Nanomaterials, Nanoroadmap Conference. Rome. 4–5 November.
- BCC report** (2007): BCC report: Global Market for Carbon Nanotubes Worth \$ 807.3 Million by 2011. [Http://www.bccresearch.com/pressroom/RNANO24C.htm](http://www.bccresearch.com/pressroom/RNANO24C.htm).
- Berger M.** (2007): Growing Nanotechnology Problems: Navigating the Patent. [Http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1367.php](http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1367.php).
- Bethune D.S., Kiang C.H., de Vries M.S. et al.** (1993): Cobalt-Catalyzed Growth of Carbon Nanotubes with Single-Atomic-Layer Walls // *Nature*. Vol. 363. № 6430.
- Blackmon R.** (2006): Scaling up CNT Production, Separation, Purification, WTEC Carbon Nanotube Manufacturing and Applications Workshop. Stafford. 3 November.
- Braun T., Schubert A., Zsindely S.** (1997): Nanoscience and Nanotechnology on the Balance // *Scientometrics*. Vol. 38. № 2.
- Choi C.Q.** (2007): Unidym – CNI is Bellwether for Nanotech Business. [Http://www.smalltimes.com/articles/stm\\_print\\_screen.cfm?ARTICLE\\_ID=287847](http://www.smalltimes.com/articles/stm_print_screen.cfm?ARTICLE_ID=287847).
- Editorials** (2006): Carbon Nanotubes // *Nano News from SEMI*. Vol. 1. № 2.
- Edwards B.C.** (2003): The Space Elevator. NIAC Phase II Final Report. [Http://www.niac.usra.edu/files/studies/final\\_report/521Edwards.pdf](http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/521Edwards.pdf).
- Gasman L.D.** (2006): *Nanotechnology Applications and Markets*. Norwood: Artech House.
- Grace R.H.** (2006): The 2006 report card on the barriers to the commercialization of MEMS and nanotechnology. [Http://rgrace.com/Papers/2006\\_Report\\_Card.pdf](http://rgrace.com/Papers/2006_Report_Card.pdf).
- Haan S.** (2007): Carbon Nanotubes Roadmaps – Opportunities in Electronics, International Workshop on Carbon – Nanotube RF NEMS and Hybrid CMOS – Carbon – Nanotube RF Integrated Circuits. Lausanne. 15 June.
- Iannotta B.** (2006): Nanotubes Lift Hopes for Space Elevator // *Aerospace America*. March.
- IEEE Invites** (2007): IEEE Invites Input on Nanoelectronics Roadmap. [Http://www.smalltimes.com/articles/stm\\_print\\_screen.cfm?ARTICLE\\_ID=291234](http://www.smalltimes.com/articles/stm_print_screen.cfm?ARTICLE_ID=291234).
- Iijima S.** (1991): Helical Microtubules of Graphitic Carbon // *Nature*. Vol. 354. № 6348.

- Iijima S., Ichihashi T.** (1993): Single-Shell Carbon Nanotubes of 1–nm Diameter // *Nature*. Vol. 363. № 6430.
- International assessment** (2007): International Assessment of Research and Development of Carbon Nanotube Manufacturing and Applications. WTEC Panel Report. [Http://wtec.org/cnm/CNM\\_final\\_report.pdf](http://wtec.org/cnm/CNM_final_report.pdf).
- Liesio J., Mild P., Salo A.** (2007): Preference Programming for Robust Portfolio Modeling and Project Selection // *European J. of Operational Res.* Vol. 181. № 3.
- Mamikunian V.** (2007): Investor Enthusiasm for Nanotech Opportunities in Electronics. Lux Research Inc. [Http://www.luxresearchinc.com](http://www.luxresearchinc.com).
- Meyer M., Persson O.** (1998): Nanotechnology – Interdisciplinarity, Patterns of Collaboration and Differences in Applications // *Scientometrics*. Vol. 42. № 2.
- Nanotechnology** (2005): Nanotechnology Growth Opportunities and Investment Overview. [Http://www.frost.com/prod/servlet/cpo/40230968](http://www.frost.com/prod/servlet/cpo/40230968).
- Nordan M.M.** (2005): Nanotechnology: Where does the U.S. stand? [Http://gop.science.house.gov/hearings/research05/june29/nordan.pdf](http://gop.science.house.gov/hearings/research05/june29/nordan.pdf).
- Roadmaps** (2006): Roadmaps at 2015 on nanotechnology application in the sectors of: Materials, Health and Medical Systems, Energy. [Http://www.nanoroadmap.it/roadmaps/NRM\\_SYNTHESIS.pdf](http://www.nanoroadmap.it/roadmaps/NRM_SYNTHESIS.pdf).
- Roco M.C.** (2005): International Perspective on Government Nanotechnology Funding in 2005 // *J. of Nanoparticle Res.* Vol. 7. № 6.
- Roco M.C., Bainbridge W.S.** (eds.). (2001): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sheet L.L.** (2006): Nanoelectronics Research and Market Opportunities in US and Japan. [Http://wps2a.semi.org/wps/portal/\\_pagr/113/\\_pa.113/813](http://wps2a.semi.org/wps/portal/_pagr/113/_pa.113/813).
- Statement of Findings** (2005): Statement of Findings Sizing the Nanotechnology's Value Chain. [Http://www.allassets.com/pdfs/sizingnanotechnologysvaluechain.pdf](http://www.allassets.com/pdfs/sizingnanotechnologysvaluechain.pdf).
- Tegart G., Johnson R.** (2004): Some Advances in the Practice of Foresight, EU–US Seminar: New Technology Foresight, Forecasting & Assessment Methods. Seville. May 2004.
- The right stuff** (2002): The Right Stuff for Super Spaceships. [Http://science.nasa.gov/headlines/y2002/16sep\\_rightstuff.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2002/16sep_rightstuff.htm).
- Wood D.** (2006): Paper Promise // *Res. in Rev.* Vol. 16. № 1.
- Young J.L.** (2006): Patent Analysis for Preparation and Application of Carbon Nanotubes. [Http://www.kosef.re.kr/community/suica/upload/300/927/4.pdf](http://www.kosef.re.kr/community/suica/upload/300/927/4.pdf).
- Zhang Chuan Yi.** (2006): Production and Applications of Carbon Nanotubes (CNTs). [Http://www.nanotubes.com.cn/05nanotubes.pdf](http://www.nanotubes.com.cn/05nanotubes.pdf).

Поступила в редакцию  
24.12.2007 г.

## The Analysis of Nanotechnology Development – Example of Carbon Nanostructures

A. I. Terekhov

The scientometric analysis of R&D in the field of carbon nanostructures is implemented. The directions and prospects of carbon nanotubes practical use are considered on the basis of available data; the peculiarities of commercializing the nanotechnology innovations are considered too. The methods for multiaspect analyses of nanotechnology development (both the methods which are being applied and those for feasible future applications) are characterized in the brief essay.