РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО ПРИОРИТЕТНОМУ НАПРАВЛЕНИЮ «ИНДУСТРИЯ НАНОСИСТЕМ И МАТЕРИАЛЫ»: АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПОЗИЦИЙ РОССИИ В ОБЛАСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ[1]

А.И. Терехов, к.ф.-м.н.,
Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН),
А.А. Терехов, Высшая школа международного бизнеса
Академии народного хозяйства при Правительстве РФ (ВШМБ АНХ)

Введение

В последнее время приставка «нано», подобно зуммеру, звучит на научных конференциях, в массовой прессе, в речах политиков и общественных деятелей, в анализах и прогнозах ведущих фабрик мысли и консалтинговых компаний. Считают, что нанотехнология[2] изменит все аспекты человеческой жизни в XXI веке благодаря возможности регулировать строение вещества и происходящие в нем процессы на уровне, определяющем электронные, химические и биологические свойства. В результате произойдет фундаментальная перестройка существующих технологий производства промышленных изделий, лекарственных препаратов, систем вооружения и т.д., потребуются глубокие преобразования в организации систем энергообеспечения, охраны окружающей среды, транспорта, связи, вычислительной техники и образования [1]. Уже в недалекой перспективе нанотехнология способна произвести заметные изменения в энергетике, электронике и здравоохранении. Она является единственной технологией, которая обещает, например, на порядок сократить стоимость и повысить эффективность солнечных батарей. Нанотехнология включена в материалы, идущие на изготовление таких батарей, проводов, по которым могла бы передаваться генерируемая энергия, водородных топливных элементов для ее хранения. Электроника выходит на пределы миниатюризации схем и, следовательно, на пределы того, насколько большая мощность может быть заложена в отдельный процессор или как много информации может быть записано на один диск. Следующий скачок в супервычислениях предполагает использование наномасштабных компонентов электронных схем: проводов и транзисторов толщиной в несколько атомов, которые создаются с помощью нанолитографии. Наноматериалы также играют ключевую роль в конкуренции с технологией жидкокристаллических дисплеев. Вероятно, следующее поколение высококачественных дисплеев (телевизоров, компьютерных мониторов и т.д.) будет использовать светодиоды на основе нанотехнологий. В медицине нанотехнология дала основание для надежд в лечении рака, восстановлении поврежденных костей и тканей. Перечень можно продолжать. В настоящее время на рынке доступны уже свыше 200 потребительских товаров, произведенных с использованием нанотехнологий, включая медицинские, косметические, спортивные и др. (их перечень с кратким описанием можно найти на сайте [2]).

Учитывая стратегическое значение развития нанотехнологии, в США в 2000 г. была принята Национальная нанотехнологическая инициатива (ННИ США), основные цели которой: расширить границы нанонауки и инженерии путем поддержки исследований и разработок; создать сбалансированную и гибкую инфраструктуру, включая квалифицированную рабочую силу; предусмотреть социальные последствия нанотехнологии; создать «великую коалицию» научных кругов, промышленности и правительства для полной реализации потенциала этой новой технологии [3]. Уровень правительственных ассигнований на исследования в области нанотехнологии является невиданным со времен Манхэттенского проекта и Американской лунной программы. В 2004 г. правительство США потратило на нанотехнологию примерно в два раза больше средств, чем на проект Генома человека в его пиковый год, а в 2005 г. ННИ по суммарным ассигнованиям обошла этот проект [4]. США ставят задачу выиграть мировую нанотехнологическую гонку. Для этого, как признается, необходимо, но не достаточно иметь самые лучшие исследования и интеллектуальную собственность – нужно захватить лидерство в производстве и коммерциализации нанотехнологической продукции.

[1] Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-06-80434) и Государственного контракта № 02.433.11.7006.
[2] На самом деле речь идет о целом кластере появляющихся технологий.

Важность развития нанотехнологии как одной из ключевых технологий XXI века осознается и в России, в том числе на самом высоком уровне. Как отмечено в [5], в сфере нанотехнологий весь мир находится на старте, и наша страна в силу накопленного потенциала располагает неплохими стартовыми возможностями. Создание национальной нанотехнологической программы с задачей выхода России на одну из лидирующих позиций провозглашено в послании Президента РФ Федеральному собранию. В [5, 6] дается обоснование необходимости, обсуждаются цели и задачи, а также принципы организации такой программы. В ЦЭМИ РАН в течение ряда лет проводится исследование процессов развития нанонауки и технологии в нашей стране, его сравнение с мировыми тенденциями. Для наукометрических оценок использованы базы данных (БД) РФФИ, Роспатента, ВАК России, Science Citation Index (SCI), Chemical Abstracts (CA), информационные ресурсы сети Internet. Разработанная методология и некоторые из полученных результатов могут быть полезны при формировании национальной программы по нанотехнологии. В Послесловии к [1] отмечено недостаточное внимание к «нанопроблематике» со стороны общественных наук. Надеемся, что настоящая статья будет способствовать исправлению ситуации.

1. Важные исторические вехи в развитии нанотехнологии. Структура проводимых исследований в России – краткая библиометрическая оценка по материалам РФФИ

Идея нанотехнологии восходит к знаменитой лекции американского физика-теоретика Р. Фейнмана, прочитанной им в 1959 г. перед собранием Американского физического общества, где он, в частности, сказал: «Известные нам принципы физики не запрещают создавать объекты «атом за атомом». Манипуляция атомами, в принципе, вполне реальна и не нарушает никаких законов природы» (цитировано по [7, с. 6]). Однако сам термин «нанотехнология» впервые применил (на конференции Японского общества точного машиностроения в 1974 г.) японский ученый Н. Танигучи, касаясь способности обрабатывать материалы для электроники с нанометровой точностью [8]. Дальнейшая краткая хронология событий такова.

1974 г. Выдан патент на первое устройство молекулярной электроники.

1981 г. Изобретен сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).

1985 г. Открыты фуллерены.

1986 г. Изобретен атомно-силовой микроскоп (АСМ). Вместе с СТМ они стали «глазами» и «пальцами», необходимыми исследователям для создания и изучения свойств нанообъектов. Опубликована книга Э. Дрекслера «Машины созидания: пришествие эры нанотехнологии», которая, сфокусировав внимание на идеях радикальной нанотехнологии (молекулярное производство с помощью мобильных нанороботов), положила начало и нанотехнологической «фантастике».

1987 г. Создан первый одноэлектронный транзистор.

1988 г. Создан первый «сконструированный белок».

1991 г. Открыты углеродные нанотрубки (УНТ).

1993 г. В США организована первая нанотехнологическая лаборатория.

1997 г. Создано нанотехнологическое устройство на основе ДНК.

1999 г. Создан переключатель для молекулярного компьютера.

2000 г. В США принята Национальная нанотехнологическая инициатива. К настоящему времени примерно у 60 стран есть свои нанотехнологические программы, и поток событий, связанных с «нано», интенсивно нарастает.

Следует добавить, что применение наноматериалов (см. Приложение) имеет более длительную историю. Ранним примером служит включение золотых наночастиц для окрашивания стекла (при наномасштабных размерах золото может менять цвета). Кроме того, наночастицы углеродной сажи в течение 100 лет использовались для упрочения автомобильных шин [4].

Нанотехнология в России имеет свой исторический шлейф: это – получение еще в 1950-е годы ультрадисперсных порошков металлов с размером частиц около 100 нм и применение их при изготовлении высокопористых мембран для разделения изотопов урана; работы по исследованию полупроводниковых наноструктур и новых форм углерода, стартовавшие в начале 1970-х гг. и т.д. К современным достижениям можно отнести присуждение зеленоградскому малому предприятию ЗАО «НТ-МДТ» в 2006 г. престижнейшей международной награды в области технических разработок – R&D 100 Award – за создание многофункциональной нанолаборатории NTEGRA. Компания поддерживает в настоящее время конкурентоспособность России на мировом рынке нанотехнологического оборудования.

Начиная с 1996 г. количество исследовательских «нанопроектов» (в названиях которых встречаются термины с приставкой «нано-»), поддержанных РФФИ, растет практически экс-

поненциально [9]. Приведем первые пять однокоренных «нанотерминов», наиболее часто встречающихся в названиях проектов:

наноструктур (-а; -ный; -ированный) 36,8% (17,1%);
нанокристалл (-ический; -итный) 11,0% (21,3%);
наночастица 7,8% (12,9%);
нанотруб (-ка; -ный) 6,4% (10,4%);
нанокомпозит (-ный) 5,9% (4,6%).

В скобках дана частота встречаемости соответствующих «нанотерминов» в названиях статей с участием российских авторов в БД SCI. Интересно, что термин «наноструктура» сочетается в названиях проектов слева с 46 различными прилагательными, среди которых наиболее часто встречаются следующие: полупроводниковая (30 раз); твердотельная (8 раз); металлическая (7 раз); углеродная, многослойная (по 4 раза); оксидная, магнитная (по 3 раза). Продолжая подобный формализованный лингвостатистический анализ, можно в первом приближении представить структуру современных ориентиров развития «нанопроблематики» в фундаментальных исследованиях российских ученых. Однако сразу можно отметить, что основное внимание уделяется проблемам, так или иначе связанным с наноматериалами.

Отобранные исследовательские проекты РФФИ за период 1993–2003 гг. выполнялись в более чем 100 организациях. По доле выполняемых проектов на первом месте институты РАН (65,3%), далее следуют вузы (19,4%), ГНЦ, отраслевые НИИ и прочие (15,3%). Среди лидеров – Физико-технический институт РАН (г. Санкт-Петербург), Московский государственный университет, Институт физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск). Рассчитанные данные показывают более равномерное географическое распределение проводимых исследований в рамках РАН, что важно в силу стратегических задач развития нанообласти.

Как следует из международного сравнения (рис. 1), в целом в нанообласти Россия на 7-ом месте[1], что на одну ступень выше занимаемого ею по количеству публикаций в БД SCI общего места (период охвата 1991–2003 гг.). Однако есть подобласти, где наша страна имеет более высокие позиции, и, прежде всего, это относится к наноматериалам и их отдельным видам.

2. Библиометрический анализ развития НИР в области наноматериалов

Известно, что материалы так или иначе служат фундаментом для 70% валового национального продукта промышленно развитых стран и, следовательно, являются жизненно важными для экономики. Существенные изменения в применяемых материалах способны приводить к сдвигам в мировой экономике и глобальной политике. По мнению организации «Химическая промышленность: взгляд в 2020 г.» наноматериалы предоставляют химической промышленности США огромную возможность внедрить множество новых продуктов, что могло бы придать импульс экономике, решить основные социальные проблемы, заново оживить существующие отрасли и создать совершенно новые виды бизнеса [10]. Кроме того, лидерство

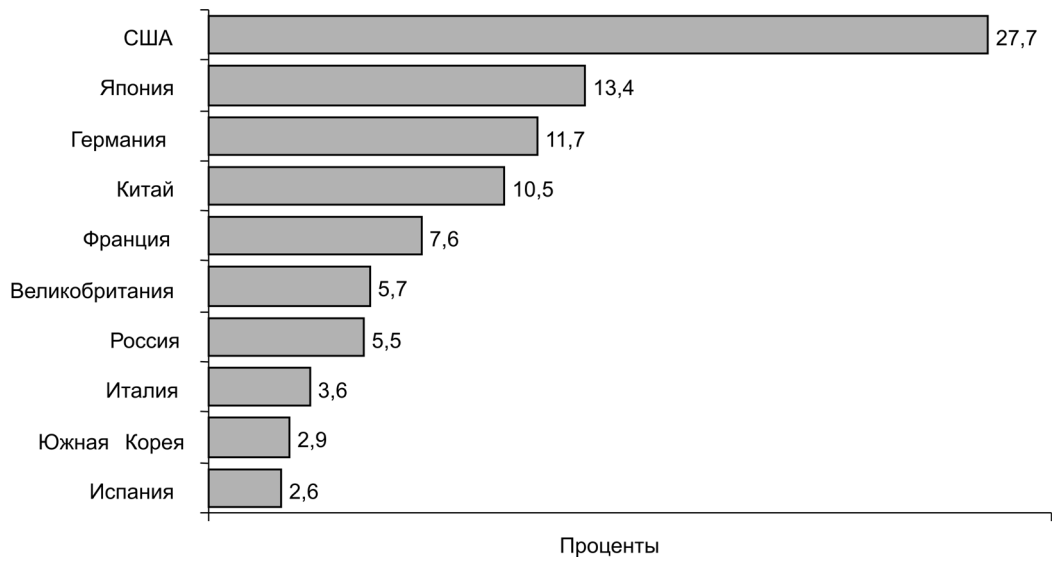

Рис. 1. Вклад стран в массив «нанопубликаций» в БД SCI

[1] Отбор публикаций производился по ключевым словам, содержащимся в названиях. Поисковое предписание: (nano* or fulleren* or quant* dot* or dendrimer*) not (nanogram* or nanosecond* or nanoplankton* or NANO2 or NANO3).

в НИР в области наноматериалов признается американскими экспертами критически важным для поддержания технологического остия национальной обороны. Именно поэтому на их разработку и производство направлены в настоящее время наибольшие исследовательские усилия и объемы инвестиций. Так, основная часть финансирования в соответствии с «Законом об исследованиях и разработках в сфере нанотехнологий 21-го века» (принят в 2003 г.) предназначается для создания 5 научных центров на базе национальных лабораторий США, которые будут сфокусированы на синтезе, обработке и производстве наноматериалов. Из 9 областей, отнесенных ННИ США к «великим вызовам», три («наноматериалы по заказу», «производство в наномасштабных шкалах», «нано -электроника, -фотоника и -магнетизм») напрямую связаны с материалами [3]. Тем не менее американские аналитики в области нанотехнологии обеспокоены растущей конкуренцией со стороны азиатских компаний, прежде всего из Китая и Кореи, занимающихся наноматериалами и способных агрессивно соперничать не только за счет трудового фактора, но и капитала. [11]. Добавим, что наноматериалы доминируют на мировом нанотехнологическом рынке: их доля в объеме продаж в 2004 г. превышала 97,5%. Наиболее быстро растущим сегментом наноматериалов являются нанотрубки: до 2008 г. ежегодный рост объема продаж прогнозируется в среднем на 173% [12].

В настоящей статье рассмотрим наноматериалы, относящиеся по классификации [10] к фундаментальным «строительным блокам»: наночастицы, квантовые точки, фуллерены, нанотрубки и дендримеры (см. Приложение). Согласно [13], по количеству ежегодно выдаваемых американских патентов в области нанотехнологии первые четыре объекта входят в лидирующую пятерку с наилучшей динамикой роста за 2000–2006 гг. у наночастиц, нанотрубок и фуллеренов. Это может означать близкое начало коммерческих приложений и развернувшуюся гонку за их патентную защиту. В такой ситуации интерес представляют динамика исследовательской активности и наличие опережающих научных заделов, выявлению которых способствует библиометрический анализ. В БД SCI за период 1991–2003 гг. найдено свыше 40 тыс. публикаций, посвященных рассматриваемым типам наноматериалов. На рис 2 сразу можно заметить отличие общей динамики роста публикационной активности отечественных и зарубежных ученых: в первом случае это кривая, характеризуемая насыщением, во втором – экспонента. Продолжение такой тенденции может означать все большее сокращение российского вклада в данную область мировой нанонауки.

Как следует из таблицы, наибольший вклад России связан с исследованиями в области фуллеренов и квантовых точек. Известны давние и плодотворные традиции бывшего СССР и России в технологиях получения наночастиц различных материалов (ультрадисперсных порошков), а также их применения. Однако исследования проводились преимущественно по

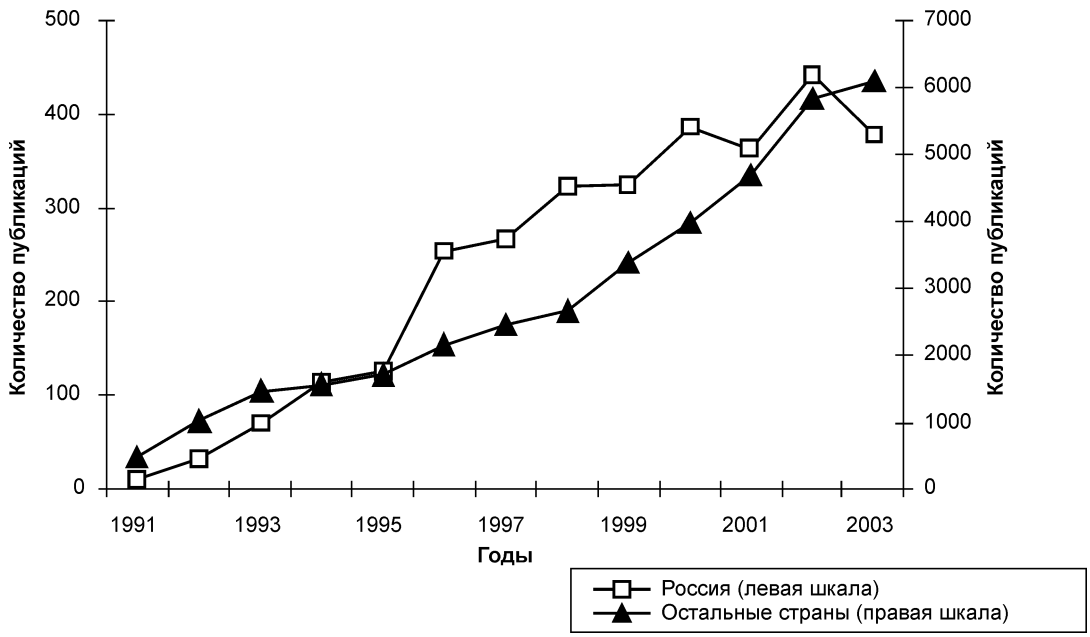

Рис. 2. Динамика публикационной активности в области изучения наноматериалов (наночастицы, квантовые точки, фуллерены, нанотрубки, дендримеры)

закрытой тематике и мало публиковались. Своеобразный обзор современного состояния с участием зарубежных экспертов можно найти в [14]. Несколько неадекватно, на наш взгляд, БД SCI отражает вклад России в тематику УНТ, поскольку отечественные ученые обладают здесь некоторыми важными достижениями, о чем свидетельствуют и высокие показатели воздействия публикаций с их участием. В целом же показатели воздействия отечественных работ в области наноматериалов выделяют их на фоне общих показателей по физике и химии. Так, самый низкий процент цитированных российских (с участием российских авторов) публикаций в области изучения наночастиц (67,8%) выше аналогичного показателя за сопоставимый период для таких отраслей науки, как физика и химия: 53,1 и 33,4% соответственно [15]. Самая низкая (табл. 1) цитируемость российских публикаций в области фуллеренов (5,7 ссылок в среднем на одну публикацию) значительно превосходит аналогичный показатель для физики и химии в целом: 3,04 и 0,95% соответственно.

эксперимента в 1985 г. – пример чисто фундаментального открытия в результате ненаправленного научного поиска. Оно стало прорывным открытием конца XX века, вызвавшим общемировое внимание и интерес. В поиск были вовлечены ученые ведущих отраслей науки, прежде всего химии, физики, биологии, за короткий период им удалось превратить это фундаментальное открытие в направление исследований и разработок, имеющих международную научно-техническую и экономическую актуальность. Уже через два года после открытия простого способа получения фуллеренов в граммовом количестве (1990 г.) число публикаций, посвященных их изучению, превысило тысячу в год [16]. Такой интерес обусловлен необычными свойствами фуллеренов, открывающими широкие возможности их прикладного использования. Согласно статистике, полученной из БД SCI, с 1991 по 2003 гг. в мировом «фуллереновом проекте» приняли участие более 75 стран. Лидирующую десятку по публикационному вкладу составили: США, Япония, Россия, Китай, Германия, Франция, Великобритания, Италия, Швейцария и Индия.

Таблица 1. Библиометрические показатели для российских публикаций по наноматериалам, содержащихся в БД SCI

Вид наноматериала	Общее число публикаций, отобранных в БД SCI	Доля публикаций с участием российских авторов (%)	% цитированных российских публикаций	Среднее число ссылок на одну российскую публикацию
Наночастицы	8750	3,98	67,8	6,1
Квантовые точки	8099	9,52	80,7	14,0
Фуллерены	14 064	11,44	73,8	5,7
Нанотрубки	6951	3,88	79,3	11,9
Дендримеры	2708	3,43	71,0	10,1

В рамках одной статьи не представляется возможным одинаково подробно охватить все типы наноматериалов, поэтому более детальный анализ развития и оценку позиций российской науки в этой достаточно обширной области выполним на примере научного направления «фуллерены». Открытие фуллеренов (удостоенное в 1996 г. Нобелевской премии по химии) знаменательно тем, что стимулировало бурный рост интереса к другим наноматериалам, кроме того, пример фуллеренов показателен для развития науки в России на переломном этапе и, наконец, очевидно, что углеродные наноматериалы (фуллерены и УНТ) составят основу разворачивающегося эволюционного варианта нанотехнологии [4].

Получение молекулы фуллерена C_{60} группой ученых Сассекского университета (г. Брайтон, Великобритания) и университета Райса (г. Хьюстон, США) в ходе физического экспе-

Интерес к исследованию новых форм углерода, увенчавшийся расчетным обоснованием стабильности молекулы C_{60} в форме усеченного икосаэдра, зародился в России еще в конце 1960-х гг. (Институт элементоорганических соединений АН СССР). Однако полномасштабное участие отечественных ученых в фуллереновой проблеме относится к началу 1990-х гг. Важную роль в институционализации области сыграло формирование программного направления «Фуллерены и атомные кластеры» в рамках ГНТП «Актуальные направления в физике конденсированных сред» (1993 г.), а также поддержка учрежденного тогда же РФФИ. Это стимулировало создание российского сообщества исследователей, занимающихся проблемой изучения и применения фуллеренов. По количеству публикуемых работ в данной области

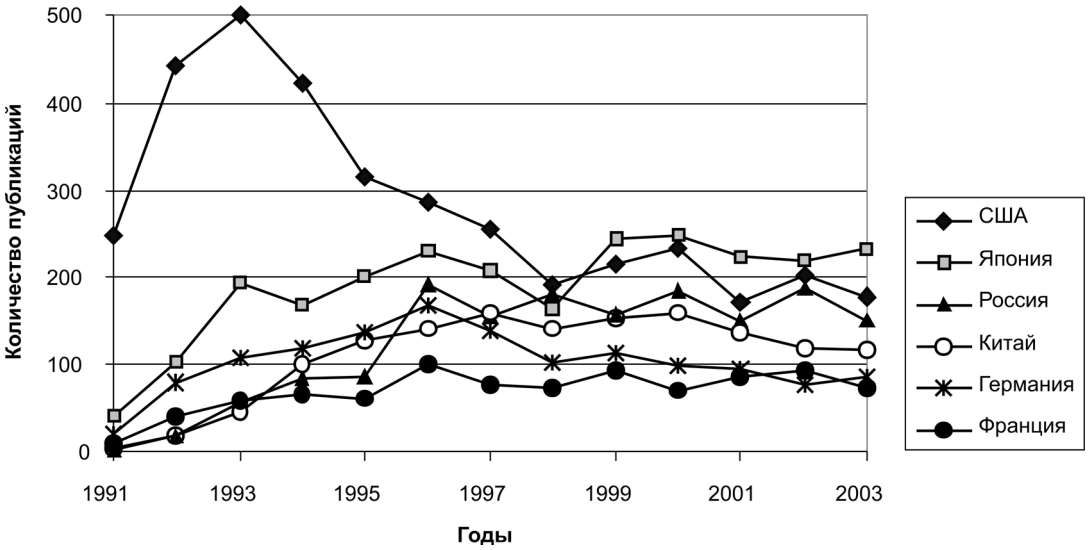

Рис. 3. Количество публикаций по фуллеренам (БД SCI), ежегодно производимых разными странами

Россия вышла на третье место в международной гонке (рис. 3), имея соавторские связи с представителями 39 стран, расположенных на всех континентах мира. На первом месте Япония, которая по публикационной активности обошла в 1999 г. США. Лишь немного отличающуюся (по объему и соотношению публикаций) картину межстранового соперничества в области фуллеренов дают расчеты по БД CA, которая включает также труды конференций и патенты [16]. Динамика общемировой публикационной активности согласно этой же базе данных включает этап бурного роста (с 1991 по 1996 гг.) и стабильно высокого уровня с небольшими флуктуациями между 3000 и 3500 публикациями ежегодно.

Для дальнейшего библиометрического анализа, оценки институциональной структуры и социально-экономических факторов развития данного направления в России отобраны: 1843 журнальных публикации (статей, обзоров, писем); 236 публикаций материалов конференции «Фуллерены и атомные кластеры»; 98 патентов; 69 кандидатских и докторских диссертаций; 153 инициативных проекта РФФИ. Динамику исследовательского и изобретательского интереса к фуллереновой проблематике, формирования конкурентоспособных научных коллективов характеризуют рис. 4–6. Можно отметить ее запаздывающий характер по сравнению с мировыми тенденциями. Согласно отобранным инициативным проектам РФФИ, состав институциональных участников фундаментальных исследований в области фуллеренов к 2003 г. практически сформировался. Проектные исследования за рассматриваемый период проводились в 56 научных организациях, среди которых преобладают академиче-

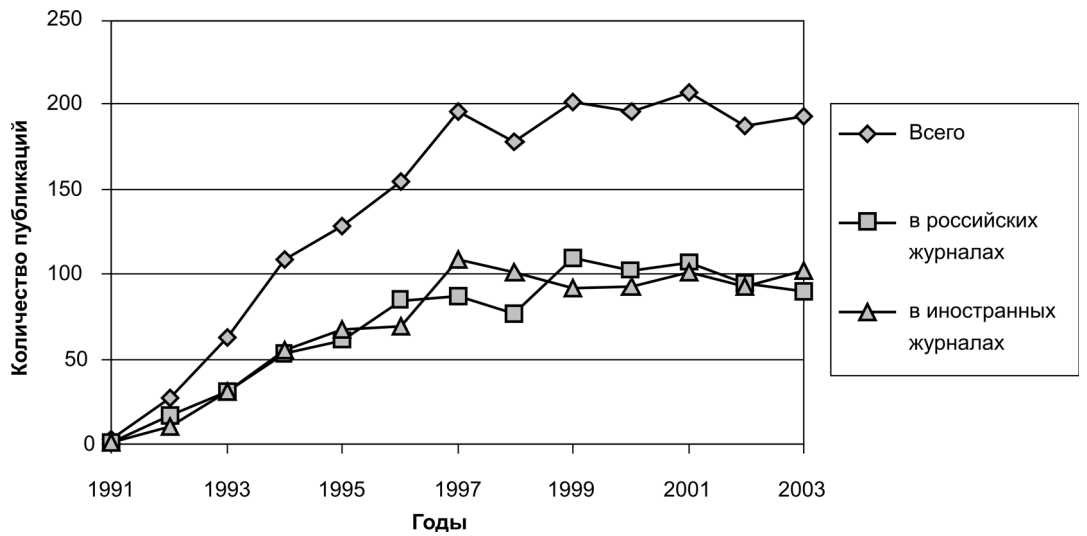

Рис. 4. Ежегодное количество журнальных публикаций российских ученых по фуллеренам (консолидированная выборка)

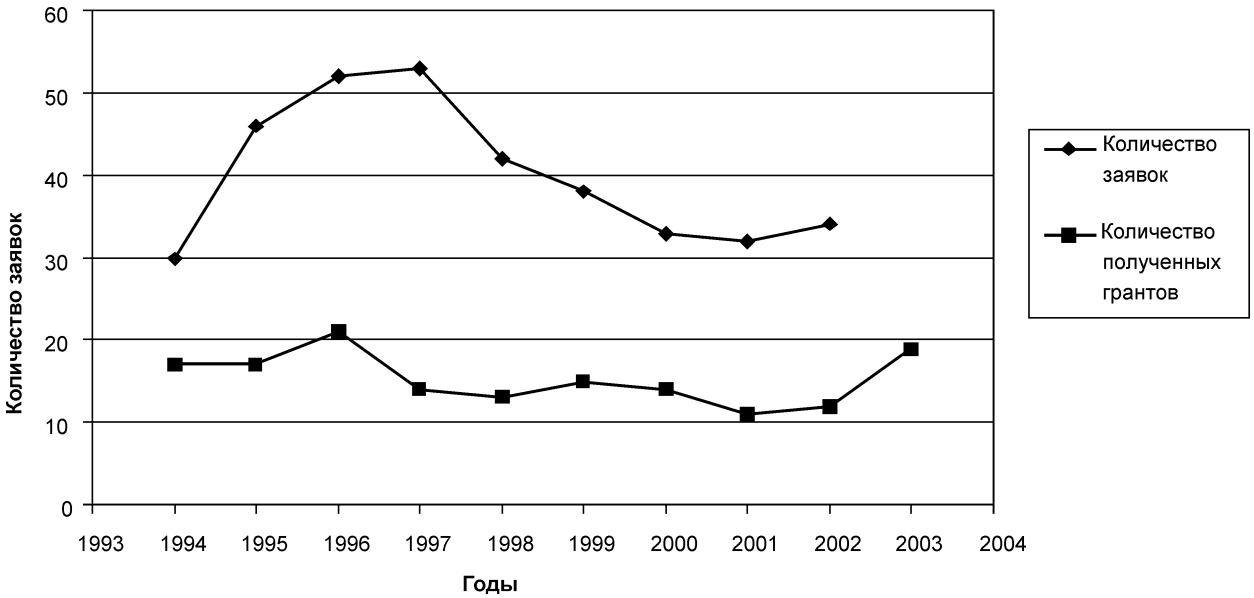

Рис. 5. Изменение количества поданных заявок и полученных грантов РФФИ на исследования в области фуллеренов

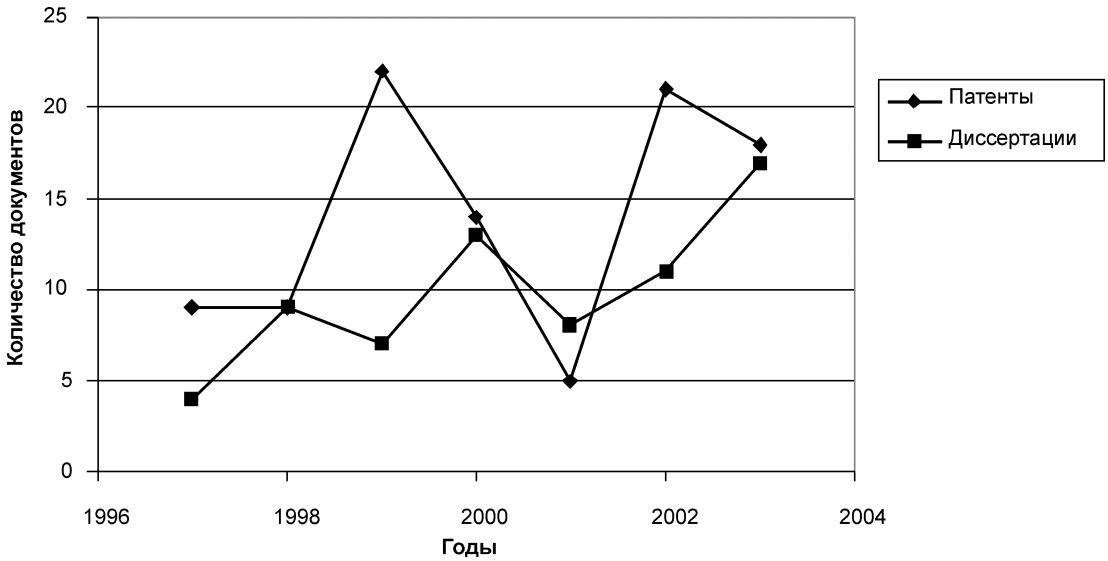

Рис. 6. Динамика выданных российских патентов; диссертаций, утвержденных ВАК России

ские НИИ (68%), далее следуют ГНЦ и отраслевые НИИ (20%), вузы (12%).

Исследовательскую активность организаций и городов характеризует их вклад в массив журнальных публикаций за 2002–2003 гг.:

Московский государственный университет – 15,5%,

Институт проблем химической физики РАН – 13,0%,

Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе РАН – 11,3%,

Институт высокомолекулярных соединений РАН – 10,3%,

Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН – 8,2%,

Институт физики твердого тела РАН – 7,1%;

Москва – 36,5%,

Санкт-Петербург – 32,3%,

Черноголовка – 17,4%,

Троицк – 7,5%,

Казань – 5,0%,

Нижний Новгород – 3,1%,

Новосибирск – 2,7%,

Екатеринбург – 2,3%,

Красноярск – 2,3%,

Уфа – 1,5%.

В лидирующую группу по количеству публикаций входят следующие ученые:

О.В. Болталина (хим. ф-т МГУ) – 137;

Л.Н. Сидоров (хим. ф-т МГУ) – 92;

В.Н. Згонник (ИВС РАН, СПб) – 85;

Ю.М. Шульга (ИПХФ РАН, п. Черноголовка) – 84;

А.П. Моравский (ИПХФ РАН, п. Черноголовка) – 74;

В.И. Соколов (ИНЭОС РАН, Москва) – 67;

Д.В. Конарев (ИПХФ РАН, п. Черноголовка) – 67;

А.С. Лобач (ИПХФ РАН, п. Черноголовка) – 66;

Р.Н. Любовская (ИПХФ РАН, п. Черноголовка) – 64;

Е.Ю. Меленевская (ИВС РАН, СПб) – 59 публикаций.

Наиболее же цитируемыми российскими учеными в данной области, согласно БД SCI, являются: О.В. Болталина (841 ссылка на 95 работ); В.Д. Бланк (489/40); Л.Н. Сидоров (464/51); В.И. Соколов (421/58); В.А. Давыдов (402/41); А.П. Моравский (393/62); Д.В. Конарев (356/62); А.В. Елецкий (322/25); В.В. Башилов (290/48); И.В. Станкевич (240/48); Ю.М. Шульга (357/70).

Можно отметить значительный вклад институтов РАН в исследовательскую базу рассматриваемого направления, вовлеченность в исследования основных российских научных центров. Составленный публикационный рейтинг ученых может быть полезен при формировании рабочих групп для экспертизы проектов по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники.

Для развития науки о фуллеренах характерна широкая международная кооперация. Более 26% журнальных публикаций за рассматриваемый период написано российскими учеными в соавторстве с их зарубежными коллегами. Наиболее тесными соавторские связи были с Германией, Великобританией и США; далее следуют Франция, Япония и Швеция. Россия сотрудничает со всеми главными участниками мировой научной гонки в этой области, за исключением Китая. Интересно, что пик интенсивности сотрудничества с Германией, Великобританией, Японией и США приходится на 2002–2003 гг., тогда как с Францией – на 1994 г., со Швецией – на 2001 г.

Численность, структура, мотивация и творческая активность сформировавшегося научного сообщества, возможности его воспроизводства в значительной степени определяют перспективы развития области, поэтому оценка кадровой составляющей представляется чрезвычайно важной. За период 1991–2003 гг. в исследованиях по фуллеренам приняли участие (опубликовали хотя бы одну статью в этой области) около 1800 российских ученых. Для распределения научной продуктивности характерно «рассеивание» статей по большому числу малопродуктивных и их «концентрация» на значительно меньшем массиве высокопродуктивных ученых. Сравнение гиперболического распределения продуктивности российского (построено нами) и мирового (см. [17]) сообществ исследователей показало относительно меньшее расслоение первого по этому показателю, что может косвенно отражать более раннюю стадию развития данного направления в нашей стране. Серьезной угрозой для перспективы могут стать старение кадров и «утечка умов» (общая беда отечественной науки). Так, число активных и мотивированных исследователей (тех, кто опубликовал в 2002–2003 гг. более одной статьи по фуллеренам) составило около 370 человек. Средний возраст 50-ти наиболее продуктивных из них был равен в 2003 г. 52 годам, а представителей первой десятки превысил 56 лет. Причем трое самых молодых ученых из первой десятки уже находятся в фактической или научной эмиграции в США и Японии. Добавим, что российская «фуллереновая диаспора» насчитывает десятки ученых мирового класса, проживающих в Европе, США и Японии. В свое время это помогло в налаживании контактов с зарубежными коллегами, получении международных грантов, что способствовало поддержанию исследований на высоком уровне и внутри страны, однако отъезд ученых означает безвозвратную утерю накопленного неотделимого знания. Происходит разрыв преемственности поколений, отставание в подготовке квалифицированных исследовательских кадров. Хотя в 2002–2003 гг. имела место положительная динамика в подготовке кандидатов и докторов наук (рис. 6), по количеству присуждаемых ученых степеней в области изучения фуллеренов Россия уступает США на порядок. Очевидно, что «старое» научное сообщество имеет меньше шансов преодолеть запаздывающий характер развития направления в нашей стране по отношению к мировому тренду.

В науковедении принято считать, что публикация оказала воздействие на развитие научной области, если на нее ссылались более 40 раз. Среди российских публикаций таких 23, из них: 3 обзора, 15 соавторских статей с зарубежными коллегами и, наконец, 5 – оригинальные статьи, написанные только российскими авторами. Это работы по ультратвердому и сверхтвердому фуллериту C_{60} (ФГУ «ТИСНУМ» и Институт спектроскопии РАН, г. Троицк); луковичному углероду (Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск); о новом фазовом переходе фуллерита C_{60} на T-P диаграмме (ИФТТ РАН и ИПХФ РАН, п. Черноголовка); о синтезе и структуре комплекса фуллерена с палладием (ИНЭОС РАН, Москва); по термодинамическим свой-

ствам фуллеренов (Химфак МГУ). Приоритет российских ученых в области синтеза и применения сверхтвердого материала на основе фуллерена C_{60} был закреплен в дальнейшем четырьмя российскими и американским патентами. Дополнительный анализ [16] показал: 50 из 90 публикаций по ультратвердым и сверхтвердым углеродным наноматериалам в БД CA имеют российское авторство, что еще раз подтверждает лидерство сложившейся отечественной школы. Хорошим потенциалом воздействия обладает статья российских ученых (ФТИ РАН, г. СПб и ИФВД РАН, г. Троицк) и их коллег из Швеции, Германии и Бразилии, опубликованная в журнале «Nature» в 2001 г. [18] и процитированная 66 раз менее чем за два года. Интерес обусловлен прикладными возможностями открытия ферромагнитных свойств полимеризованного фуллерена для разработки систем хранения данных нового поколения, создания легких неметаллических покрытий, защищающих авиационные конструкции от электромагнитного излучения, радиопомех и т.д.

Выявление высоко цитируемых публикаций способно, помимо прочего, указывать на те направления, где возможно формирование центров научного и, в перспективе, технологического превосходства. Дальнейший анализ с использованием в том числе БД Роспатента показал, что такими направлениями для России могли бы стать: *ультратвердый материал на основе фуллерена C_{60} (разработка ученых из Троицка); фуллерен-кислород-йодный лазер (разработка ученых из Санкт-Петербурга); ферромагнитный полимеризованный фуллерен C_{60} (совместное открытие российских ученых из Санкт-Петербурга и Троицка, а также ученых Швеции, Германии и Бразилии).* Значительные научные заделы имеются в области исследования нелинейно-оптических свойств фуллеренов, создания на их основе противовирусных вакцин и др.

Одна из тенденций в изучении углеродных наноструктур – перенос акцентов с фуллеренов на нанотрубки, количество публикаций по которым растет экспоненциально. Это объясняется еще более яркими, чем у фуллеренов, внедренческими перспективами последних, часть из которых УНТ унаследовали от фуллеренов, другую – от углеродных нановолокон, а третья возникла благодаря уникальным свойствам самих УНТ. В таких ситуациях научно-технологический комплекс должен быть способен на маневренность и гибко реагировать на изменение тенденций. Однако сопоставление библиометрических данных по России и по ее ближайшему конкуренту Китаю (рис. 7) говорит не в нашу пользу (хотя, конечно, не следует сбрасывать со счетов закрытый характер ряда выполняемых НИОКР).

«Фуллерены» – новое быстро развивающееся научное направление с широким спектром технологических выходов, для дальнейших коммерческих перспектив которого важно создание патентного фундамента. Сравнительный анализ тематики отобранных проектов РФФИ и тематической направленности патентуемых результатов, данных о составе групп исследователей по проектам и изобретателей по заявкам на патенты, а также других доступных данных позволил сделать вывод, что грантовая поддержка фундаментальных исследова-

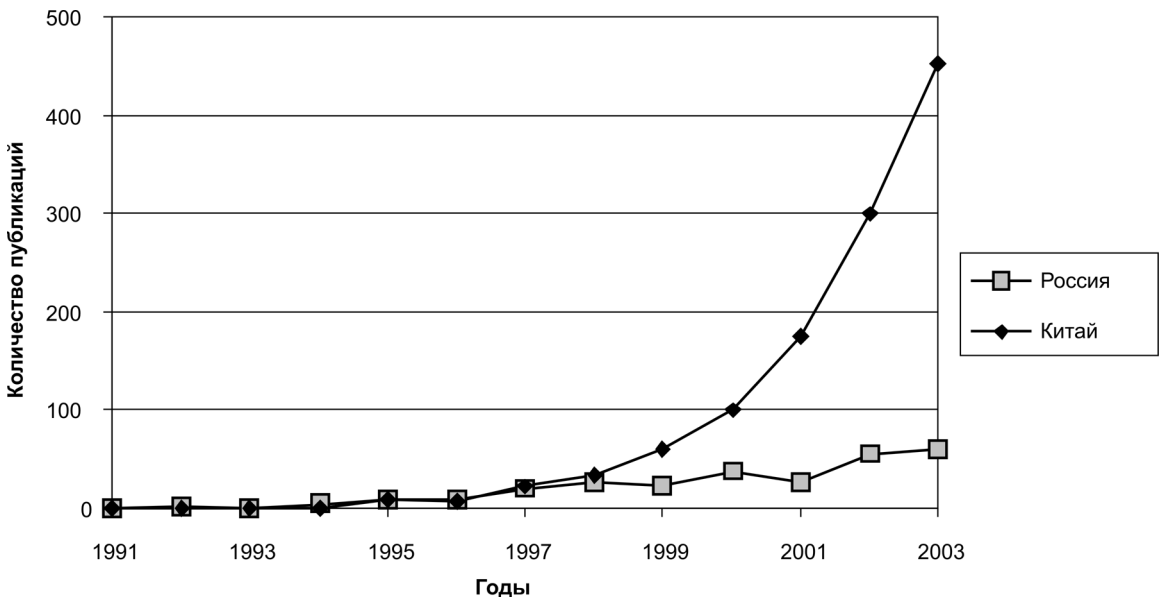

Рис. 7. Ежегодное количество публикаций по УНТ (БД SCI) российских и китайских авторов

ний сыграла важную роль в создании первых отечественных изобретений в области фуллеренов. Патенты на изобретения, полученные химическим факультетом МГУ («Устройство для синтеза фторпроизводных фуллеренов» по заявке от 29.01.1998 г.), Санкт-Петербургским государственным техническим университетом («Способ получения кристаллических фуллеренов» по заявке от 11.06.1997 г.), Институтом элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова («Адъюванты» по заявке от 10.04.1997 г.), НТЦ «Сверхтвердые материалы» и группой сотрудников РАН («Сверхтвердый углеродный материал, способ его получения и изделие, выполненное из сверхтвердого углеродного материала» по заявке от 11.10.1996 г.), Институтом биоорганической химии РАН им. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова («Фуллереновые производные гликопептида, обладающие адъювантной активностью» по заявке от 10.04.1997 г.) с большой степенью достоверности можно рассматривать как практический выход исследований по проектам РФФИ.

Краткий тематический анализ российских патентов, выданных в 2001–2003 гг., дополняет более ранний анализ [19]. Свыше 70% патентов связаны с получением фуллеренов и их производных, фуллеренсодержащих веществ, что логично объяснить стремлением к поиску более технологичных и экономичных способов производства исходного сырья для промышленного использования фуллеренов. Выделяются две группы патентов, относящихся к собственно применению фуллеренов. В «биомедицинскую» группу входят 4 патента. ЗАО «Деско» (г. Нижний Новгород) запатентовано изобретение, включающее использование аминокислотных и дипептидных производных фуллерена для химиотерапии опасных вирусных инфекций [20], еще два изобретения этого ЗАО [21, 22] направлены на упрощение технологического процесса и снижение стоимости целевого продукта – водорастворимых аминокислотных производных фуллерена и их солей. Изобретение, основанное на применении фуллерена C_{60} в качестве адъюванта для новых вакцин, запатентовано Санкт-Петербургским НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера [23]. Все это – свидетельство дальнейшего продвижения и патентоспособности исследований, начатых ранее в московских академических НИИ: ИНЭОС и ИБХ РАН [19]. К другой группе изобретений привели исследования оптических свойств фуллеренов, выполненные в НИИ лазерной физики (НИИ ЛФ) и ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова» (г. СПб). Первое из них [24] ориентировано на применение в лазерной энергетике и медицине, предметом второго [25] явилось устройство для голографической записи информации. О наращивании изобретательской активности по этому направлению говорят две выставленные заявки на патентование фуллеренсодержащего нелинейного поглотителя интенсивного лазерного излучения инфракрасного диапазона спектра для систем контроля и обработки оптической информации (заявитель – НИИ ЛФ) и нелинейно-оптического элемента для ограничения потоков электромагнитного излучения (заявители – ЗАО «Астрин-Холдинг» из СПб и НИИ ЛФ). Наметилась ориентация изобретательской деятельности на конечный потребительский спрос: так, выдан патент на пищевую добавку-бальзам, которая в качестве компонента включает масляный или жировой раствор фуллерита [26]; выставлены по две заявки на косметический крем и на фильтр для табачных изделий, в которых используется фуллерит.

Отметим, что более 60% получателей российских патентов – это академические НИИ (которые зачастую не в состоянии поддерживать их действие) и физические лица, тогда как в США примерно такая же доля патентов приходится на фирмы, главным образом крупные. Подобную ситуацию нельзя считать благоприятной для инноваций, она может приводить также к «утечке» из России патентоспособных идей. Поиск в полнотекстовой БД Патентного ведомства США позволил найти за рассматриваемый период три патента на изобретения в области фуллеренов с участием российских (или бывших российских) ученых [27–29]. Упоминавшийся уже патент на получение сверхтвердого углеродного материала на основе фуллерена [27] выдан Министерству науки и технологии РФ (НТЦ «Сверхтвердые материалы»); два же других – на изобретения в области фторирования фуллеренов [28] и многослойных фуллеренов [29] – выданы немецкой фирме по производству оптоволокна и японскому исследовательскому центру в области материалов. Такая «утечка», наряду с отъездом ученых, приводит к оголению отечественной инновационной системы. Показательно также, что крупная химико-фармацевтическая компания из Германии «Хехст АГ», получившая два российских патента, впоследствии отказалась от их поддержки, видимо, пессимистически оценив перспективы создания в России достаточно емкого рынка соответствующих продуктов и технологий.

Заключая раздел, отметим: наличие современных баз данных позволяет, используя средства информационного анализа и наукометрии, сформировать достаточно целостное и

структурированное представление о состоянии и перспективах развития той или иной научной области, научно-технического направления, которое может служить первым шагом к «конструктивной» экономике знаний.

3. Экономические аспекты применения нанотехнологий и материалов

Несмотря на некоторые потенциальные риски для здоровья и экологии (эти проблемы остаются предметом дискуссий), правительства многих стран, особенно развитых, уверены, что наноиндустрия может стать одним из важных факторов экономического роста. Так, в Японии, которая второй после США ввела свою нанотехнологическую программу, четко понимают, что коммерциализация нанотехнологии станет ключевой компонентой экономического роста и средством реструктуризации национальной экономики и компаний в стратегических отраслях. В Китае, например, считают, что победа в гонке будет зависеть от создания конечных продуктов, интегрирующих нано-, био- и инфотехнологии и т.д. По оценкам аналитиков из нью-йоркской консультативной фирмы Lux Research продукты, произведенные с использованием нанотехнологии (от противомикробных холодильников до лекарств, усиленных с помощью наночастиц), приносят сегодня на рынке среднюю ценовую премию в 11% по сравнению с сопоставимыми обычными продуктами. Ожидается, что в 2014 г. стоимость произведенных в мире товаров с включением нанотехнологии составит 2,6 триллиона долларов, или 15% от совокупного мирового выпуска [11]. Известный инвестиционный банк «Мерил Линч» ввел в апреле 2004 г. нанотехнологический индекс, символизируя интерес Уолл-Стрита к перспективам нанотехнологии, а 19 из 30 крупных компаний, включенных в промышленный индекс Доу-Джонса, уже приняли свои нанотехнологические инициативы.

Наноматериалы будут продолжать доминировать на мировом рынке, однако уже к 2008 г. их доля должна снизиться до 74% [12]. Поэтому перспективный экономический анализ правильно строить, используя стоимостные цепи. Цепь добавленной стоимости для нанотехнологии можно представить в виде трех стадий, пронизывающих, как правило, многие отрасли (табл.. 2).

Именно анализ на основе стоимостных цепей позволил специалистам из Lux Research более точно оценить коммерческий потенциал нанотехнологии, показать, что для стратегических инвесторов выгоднее сосредоточить внимание на приложениях, находящихся в средней части таких цепей, как потенциально наиболее прибыльных и т.д. Заметим также, что игнорирование стоимостных цепей при отборе компаний в нанотехнологический индекс «Мерил Линч» на начальном этапе стало одной из причин его провала, привело к критике со стороны инвесторов и последующей корректировке.

В настоящее время в мире формируется научно-промышленный комплекс для крупномасштабной коммерциализации фуллеренов, нанотрубок и продуктов на их основе. Базисными элементами такого комплекса на Западе являются крупные корпорации, такие как IBM, Mitsubishi, Hoechst AG, имеющие собственные исследовательские подразделения, а также поддерживающие тесные контакты с многочисленными начинающими наукоемкими компаниями. Первые инвестируют в исследования и разработки, проводимые вторыми, получая право (в случае успеха) на коммерциализацию предполагаемого инновационного продукта. Такие опционные контракты заключены, например, между промышленным гигантом Merck и компанией C Sixty (фармацевтика), военно-промышленной компанией BAE Systems и Nantero (электроника). Корпорация Mitsubishi через венчурный фонд финансирует компании, применяющие фуллерены, стремясь найти «локомотив» массового спроса. Строительство мощностей для тоннажного производства фуллеренов (например, Mitsubishi) и УНТ (например, Mitsui) разрывает замкнутый круг «высокие це-

Таблица 2. Стоимостная цепь нанотехнологии

Наноматериалы: (наномасштабные структуры в необработанном виде)	наночастицы, квантовые точки, фуллерены, нанотрубки, дендримеры и т.д.
Промежуточные нанопродукты: (полуфабрикаты с наномасштабными свойствами)	покрытия, ткани, чипы памяти, оптические компоненты, фармацевтические материалы, сверхпроводящие провода и т.д.
Продукты на основе нанотехнологии: (конечные товары, включающие нанотехнологию)	автомобили, самолеты, компьютеры, изделия бытовой электроники, приборы, лекарства, одежда, обработанные пищевые продукты и т.д.

ны>низкий спрос>высокие цены» в отношении углеродных наноматериалов, создает предпосылки для расширения применений и, соответственно, спроса на них.

В России, кроме уже упомянутых, проводятся следующие исследования и разработки в различных областях возможного применения фуллеренов (подробнее см. [30]).

В области биологии и медицины созданы водорастворимые аминокислотные и пептидные производные фуллерена C_{60} для использования в качестве адъювантов в высокоэффективных вакцинах и антивирусных препаратах; разработан фуллеренсодержащий сорбент для коррекции плазмы крови с целью предупреждения и лечения атеросклероза; ведется изучение перспектив применения фуллерен-кислород-йодного лазера для лечения рака и вирусных инфекций.

В области энергетики проводятся исследования по разработке накопителей водорода на основе углеродных наноструктур (фуллеренов, УНТ, углеродных нановолокон); изобретенный учеными из НИИ ЛФ фуллерен-кислород-йодный лазер может быть использован в лазерной энергетике для передачи солнечной энергии на большие расстояния с высоким КПД.

В трибологии изучаются трибологические свойства фуллеренов и фуллеренсодержащих материалов для применения в качестве присадок к маслам и консистентным смазкам; разработаны материалы с улучшенными трибологическими свойствами путем введения в полимерное связующее углеродной наноструктуры фуллероидного типа, а также высокотемпературного прессования смесей порошков железа или кобальта и фуллеритов.

В металлургии интерес представляет синтез фуллеренов и их соединений в структуре железоуглеродистых сплавов. Обнаружено зарождение фуллеренов в расплавах сталей в процессе их кристаллизации и присутствие углеродных скоплений в виде фуллеренов на примере серого чугуна; исследованы закономерности формирования фуллеренсодержащих фаз в материалах, полученных методом порошковой металлургии.

Некоторые перспективные отечественные разработки представлены в сборнике с символическим названием «Перспективы фуллереновой нанотехнологии», вышедшем под редакцией одного из основоположников науки о фуллеренах Э. Осавы [31]. Ряд из них доведен до готовых технологий, например: создания и производства сверхтвердых материалов на основе фуллеренов; наномодифицирования железоуглеродистых расплавов. Большой интерес к передаче энергии из космоса на Землю с помощью фуллерен-кислород-йодного лазера проявляется со стороны программы «Энергетика 21-го века», финансируемой японским правительством.

В отличие от Запада крупные российские компании устойчивого интереса к нанотехнологии пока не проявляют. Движущей силой нарождающегося рынка углеродных наноматериалов являются небольшие наукоемкие фирмы, созданные в основном академическими или отраслевыми учеными: ЗАО «Астрин-Холдинг» (СПб), «Инновации Ленинградских институтов и предприятий» (СПб), «Деско» (Нижний Новгород), ФГУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов» (Троицк) и др. В отсутствии массового спроса применение фуллеренов носит ограниченный характер: в качестве катализаторов при синтезе алмазов из графита, модификаторов конструкционных углепластиков, для изготовления элементов высокоточных приборов, придания гидрофобных свойств мраморoподобным породам и т.д. На некоторые из отечественных разработок имеется зарубежный спрос: дополнительное оснащение к приборам ночного видения, защищающее их от яркой вспышки (Германия); концентрат углеводородной смеси высокой реакционной способности для ликвидации последствий разлива нефтепродуктов (Литва, Индия, Сингапур); фуллеренсодержащие полимеры для очистки водных и газовых смесей (Сингапур) и др.

Массовым потребителем фуллеренов способно стать машиностроение, транспорт, строительство, причем для обеспечения спроса мог быть организован их промышленный выпуск, например в Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде. Неплохие результаты в ряде случаев дает уже применение более дешевой, чем чистые фуллерены, фуллереновой сажи (присадки к маслам), а также имеющегося в нашей стране природного минерала шунгита (добавки в углепластики). Однако для полномасштабной реализации научных заделов, возможностей их промышленного освоения необходимы глубокие преобразования в технологическом базисе экономики, ее перевод на инновационные рельсы.

Известно, что в индустриальную эру от момента фундаментального открытия до момента его эффективного практического применения проходило обычно от 15 до 40 лет [32]. В случае нанотехнологии путь от фундаментального открытия до приложений (от первой статьи до рынка) занимал, например, 9 лет для гигантской магниторезистивности, 12 лет – для

фоторезистов и магниторезистивной оперативной памяти [3]. Судя по достигнутым объемам производства в мире (по оценкам 108 тонн в 2004 г.), УНТ близки или уже находят массовое применение.

Наряду с необходимостью считаться с экологическими рисками, неоднозначными реакциями общества (как это было в случае биотехнологии), препятствием для продвижения нанотехнологии может стать ее необычность для экономического анализа, неразработанность методов и трудности в оценке «нано-бизнеса». Множественность приложений, зависимость от научной инновации, которую нельзя надежно предсказать, отсутствие исторической статистики об успехах и неудачах на начальном этапе, а также трудности в определении нанотехнологии без специальных знаний порождают существенные неопределенности для инвесторов. Этим во многом объясняют незначительный пока приток венчурного капитала (всего около 2% от мировых объемов), который по идее призван сыграть решающую роль в переводе нанотехнологии из лабораторий на рынок. Для ликвидации пробелов потребуются совместные усилия ученых многих специальностей: экономистов, математиков, специалистов по маркетингу, менеджменту и т.д.

Заключение

Коль скоро мир на старте нанотехнологической гонки, полезно, хотя бы кратко, очертить конкурентные преимущества некоторых из ее участников. Китай (наш ближайший соперник), который среди немногих стран начал применять нанотехнологию в 1990-е гг., имеет: исследовательские кадры высокого уровня, многие представители которых прошли подготовку в США, Европе и Японии, причем ряд ученых являются лидерами в своих областях; три национальных центра и свыше 20 нанотехнологических институтов при университетах; хорошую оснащенность оборудованием; высокий уровень проводимых НИР, особенно в области наноматериалов; огромный внутренний рынок, идеальный для роста предпринимательства. К этому можно добавить низкую стоимость труда, отсутствие барьеров для новых технологий, молодое и активное общество, значительный объем иностранных венчурных инвестиций, низкие налоги и поддержку правительства. Япония полагается на хорошо зарекомендовавшую себя промышленную политику координации между государственным и частным секторами в сфере высоких технологий в совокупности с самым большим в мире бюджетом, выделяемым на нанотехнологические исследования. Основная коммерциализация предполагается в отраслях, связанных с информационными технологиями, на основе подхода «снизу вверх». США, наученные опытом микроэлектроники, когда, по их мнению, американские НИР служили топливом для промышленного бума в азиатских странах, обеспечивая их процветание, ясно осознают необходимость лидерства в производстве и коммерциализации нанотехнологической продукции. Реализуемый ими подход отличает комплексность: от создания мощной исследовательской и инфраструктурной сетей до мер экспортной и торговой политики, стратегии удерживания иностранных студентов. Интересно, что в практике организации европейскими и азиатскими странами фондов для совместного выполнения нанотехнологических проектов корпорациями и правительственными учреждениями США усматривают политику обеспечения конкурентных преимуществ местным компаниям, которой нет у самих США. Свои возможности и преимущества в развитии нанотехнологий имеет и Россия: большой исторический опыт и накопленные научные заделы; проведение исследований по ряду направлений на мировом и выше мирового уровне; квалифицированные кадры, о которых необходимо, правда, постоянно заботиться; практический опыт (в том числе успешный) ряда отечественных малых наукоемких компаний; уникальную минерально-ресурсную базу, которая может быть важна, например, для разработки наноматериалов и т.д. Вопрос в том, как мы сможем все это организовать.

Настоящая работа выполнена в русле мер по созданию и развитию нанотехнологий в нашей стране в их аналитической части [6]. При ее проведении авторы опирались на объективные данные и наукометрический анализ, консультации с экспертами, использовали наиболее взвешенные оценки, доступные в литературе.

Приложение

Наноматериалы – материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нанометров. При уменьшении размеров до нанометрового масштаба материалы способны приобретать уникальные качества: высокую прочность, жесткость, электро- и теплопроводность и т.д. Фуллерены и нанотрубки в зависимости от тонких особенностей молекулярной структуры могут быть диэлектриками, полупроводниками, обладать металлической и высокотемпературной сверхпроводимостью. Столь уникальные свойства наноматериалов объясняют: высоким отношением поверхности

к объему; кооперативными явлениями среди ограниченного числа атомов и молекул; наличием квантовых эффектов в наноразмерной структуре [10].

Наноматериалы обладают широкими возможностями для практических применений. Далеко не полный перечень включает: катализаторы, следующее поколение компьютерных чипов, дешевые дисплеи с плоской панелью, люминофоры для телевидения высокой четкости, батареи с высокой плотностью энергии, накопители водорода, средства высокоточной доставки лекарств, наполнители для вакцин, более долговечные медицинские имплантанты, магниты высокой мощности, высокочувствительные сенсоры, лазеры, более твердые и ударновязкие режущие инструменты, изоляционные материалы, аэрокосмические компоненты с улучшенными характеристиками, более совершенные платформы вооружения, специальные покрытия, обеспечивающие скрытность по различным физическим полям объектов военной техники, лазерные затворы и т.д.

Все традиционные материалы, такие как металлы, полупроводники, стекло, керамика или полимеры, в принципе могут быть наноструктурированы. Однако при эволюционном варианте развития нанотехнологии, который выходит сейчас на передний план, целью становится не просто получение улучшающего эффекта за счет наноструктурирования материала, а построение наноустройства, способного делать что-либо интересное (наносенсоры, дисплеи на нанотрубках, термоэлектрические преобразователи и т.д.). Практически идеальные (но не единственные) материалы для эволюционной нанотехнологии – углеродные наноматериалы.

Фуллерены – новая аллотропная форма молекулярного углерода, наряду с алмазом и графитом. Полученная в 1985 г. в физическом эксперименте совершенная молекула чистого углерода (в форме полого полиэдра, составленного из 5- и 6-угольных граней, встречающихся по три в каждой вершине, где располагаются 60 атомов углерода) и полученный затем кристаллический фуллерен C_{60} вызвали значительный интерес материаловедов. В дальнейшем были открыты другие фуллерены, содержащие намного больше атомов углерода и принимающие иные формы. Одной из таких форм являются **углеродные нанотрубки** (УНТ) – полые цилиндрические молекулы углерода. Принадлежат к самым жестким и прочным из известных волокон, кроме того, обладают замечательными электронными свойствами и необычно высокой теплопроводностью. Такое сочетание делает УНТ весьма перспективными для самых разнообразных приложений [6].

Наночастицы – агрегаты из атомов, служащие мостом между малыми молекулярными кластерами (размером 0,2–1 нанометр) из нескольких атомов и твердыми телами, содержащими миллионы атомов и имеющими свойства макроскопических объемных материалов. Спектр применения наночастиц очень широк.

Квантовые точки – наноструктуры приблизительно сферической или кубической формы, которые достаточно малы (2–10 нм), чтобы проявлять типично квантовое поведение в оптических и электрических процессах. Могут применяться при создании лазеров (например, голубого лазера для считывания данных), а также для квантовой криптографии и вычислений.

Дендримеры являются новым классом трехмерных молекул, синтезируемых путем повторяющегося ряда ветвлений с целью создания новой уникальной архитектуры. Точно проектируемая архитектура, гармоничная растворимость, низкая токсичность и иммуногенность, а также биоприспособленность делают их идеальными «строительными блоками» для бионанотехнологии.

Литература

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливисатоса. М.: Мир. 2002, 291 с.

2. http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44&action=view&p=0.

3. *Roco M.C.* Nanoscale Science and engineering: Unifying and transforming tools // Journal of the American Institute of Chemical Engineers. 2004. Vol. 50, № 5. P. 890–897.

4. *Hunt W.H.* Nanomaterials: Nomenclature, novelty, and necessity // Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. 2004. Vol. 56, № 10. P. 13–18.

5. *Ковальчук М.В.* «Нанотехнологии дают нашей стране шанс выйти в лидеры» (на сайте: http://www.rusrev.org/content/review/print.asp?ids=128&ida=1260).

6. *Алфимов С.М., Быков В.А., Гребенников Е.П., Желудева С.И., Мальцев П.П., Петрунин В.Ф., Чаплыгин Ю.А.* Развитие в России работ в области нанотехнологий (на сайте: http://www.microsystems.ru/files/publ/753.htm).

7. *Фейнман Р.Ф.* Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики // Российский химический журнал. 2002. Т. XLVI, № 5. С. 4–6.

8. *Taniguchi N.* On the basic concept of «nano-technology» // Proceedings of the International Conference on Production Engineering. Part II. Tokyo: JSPE. 1974. P. 18–23.

9. *Терехов А.И.* Библиометрическая оценка развития научно-технической области (по материалам грантов и патентов) // Науковедение. 2002. № 4. С. 139–143.

10. http://www.chemicalvision2020.org/pdfs/nano_roadmap.pdf.

11. http://www.physorg.com/printnews.php?newsid=66479393.

12. http://www.ceramicbulletin.org/months/06-04/nano.pdf/

13. http://nanowerk.com/spotlight/spotid=386.php.

14. Nanoparticle technology: production and application development – a mission to Russia and Ukraine. Report of DTI Global Watch Mission. 2005 (на сайте: www.oti.globalwatchonline.com/online_pdfs/36556MR.pdf).

15. http://magazines.russ.ru/oz/2002/7/20020739. html.

16. *Terekhov A.I., Efremenkova V.M., Stankevich I.V., Krukovskaya N.V., Terekhov A.A.* Information Resources for Evaluating the Development of Research Direction – «Fullerenes» // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2006. Vol. 14, № 2–3. P. 579–584.

17. *Kostoff R.N., Braun T., Schubert A.P., Toothman D.R., Humenik J.A.* Fullerene data mining using bibliometrics and database // J. Chem. Inf. Comput. Sci. 2000. Vol. 40, № 1. P. 19–39.

18. *Makarova T.L., Sundqvist B., Hohne R. et al.* Magnetic carbon // Nature. Vol. 413, № 6857. P. 716–718.

19. *Терехов А.И., Мирабян Л.М., Мамаев В.Л.* Комплексный подход к оценке развития научного направления с использованием компьютерных баз данных // Вестник РФФИ. 2002. № 2 (28). С. 47–57.

20. Патент № 2196602 РФ. Средство для ингибирования ВИЧ- и ЦМВ-инфекций и способ их ингибирования / Миллер Г.Г., Кущ А.А., Романова В.С. 20.01.2003.

21. Патент № 2213049 РФ. Способ получения водорастворимых аминокислотных производных фуллерена / Раснецов Л.Д., Шварцман Я.Ю., Лялина И.К. и др. 27.09.2003.

22. Патент № 2213048 РФ. Способ получения водорастворимых солей аминокислотных производных фуллерена / Раснецов Л.Д., Шварцман Я.Ю., Лялина И.К. и др. 27.09.2003.

23. Патент № 2184566 РФ. Способ получения вакцины / Жебрун А.Б., Быстрова Г.Ф. 10.07.2002.

24. Патент № 2181224 РФ. Способ получения генерации стимулированного излучения на атомах йода / Мак А.А., Данилов О.Б., Белоусова И.М. 10.04.2002.

25. Патент № 2184988 РФ. Жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света на основе фуллеренсодержащего полиимида для голографической записи информации / Каманина Н.В., Василенко Н.А. 10.07.2002.

26. Патент № 2212894 РФ. Пищевая добавка – бальзам / Плугин А.И., Силантьев А.А. 27.09.2003.

27. Patent № 6245312 US. Superhard carbon material, a method for its production, and articles made therefrom / Blank V.D., Buga S.G., Dubitsky G.A., Serebryanaya N.R., Popov M.Y. 12.06.2001.

28. Patent № 6386468 US. Mechano-chemical fluorination: improved method of fullerene fluorination / Neuberger W., Kalinin V., Alikhanyan A. 14.05.2002.

29. Patent № 6509095 US. Multi-layer fullerenes and method of manufacturing same / Umnov A.G., Mordkovich V.Z., Inoshita T. 21.01.2003.

30. *Терехов А.И., Терехов А.А.* Об оценке развития нового направления в области нанотехнологии // Межотраслевая информационная служба. 2004. № 2. С. 12–30.

31. Perspectives of Fullerene Nanotechnology / Ed. E. Osawa. Norwell, MA: Kluwer Academic. 2002. 385 p.

32. *Coates J.* The next twenty-five years of technology: opportunities and risks // 21st century technologies: promises and perils of dynamic future. P.: OECD, 1998. P. 33–46.