
Наукометрия

А.И. Терехов

Наукометрические индикаторы для оценки развития нанотехнологии: позиции России в области фундаментальных наноматериалов

Показана структура гражданской нанонауки в России, выполнен наукометрический анализ развития НИР и оценены позиции страны в области наноматериалов.

Введение

Нанотехнология¹ — выбранный правительствами многих стран научно-технический приоритет. К настоящему времени более 60 стран приняли национальные нанотехнологические программы, причем, помимо всех развитых, среди них и такие развивающиеся страны, как Индонезия, Малайзия, ЮАР и др. В своем послании Федеральному собранию в 2006 г. Президент РФ провозгласил создание национальной нанотехнологической программы, которая позволила бы вывести Россию на одну из лидирующих позиций в мире. В апреле 2007 г. им утверждена инициатива “Стратегия развития nanoиндустрии”, предусматривающая формирование инфраструктуры Национальной нанотехнологической сети; создана Российская корпорация нанотехнологий (ГК РОСНАНО), которая, располагая среднегодовым бюджетом до 2015 г. около 1 млрд. дол., призвана обеспечить организационную и финансовую поддержку инновационной нанотехнологической деятельности.

Нанотехнология в России (бывшем СССР) имеет свои исторические вехи [1–3]. Можно отметить получение еще в 1950-е годы ультрадисперсных порошков металлов с размером частиц около 100 нм, применявшихся при изготовлении высокопористых мембран для разделения изотопов урана; работы по исследованию полупроводниковых наноструктур и новых форм углерода, стартовавшие в начале 1970-х годов и т.д. Однако лишь с появлением доступа к мировым информационным ресурсам (SCISEARCH, SCOPUS, БД US PTO и др.), формированием отечественных баз данных (Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), Роспатента и др.) мониторинг и сравнительный анализ процессов развития нанотехнологии в России и в мире стали возможны на систематической основе. Как показали уже первые зарубежные исследования [4, 5], наукометрия способна внести значительный вклад в изучение глобальных тенденций развития нанотехнологии, оценку пози-

¹ На самом деле это “зонтичный” термин для технологий, осуществляющих манипуляцию веществом в нанодиапазоне (примерно 1–100 нм).

ций и возможностей разных стран в нанотехнологической гонке. В 2007 г. журнал “Scientometrics” отвел целый номер для результатов наукометрических исследований в области нанотехнологии, выполненных специалистами из США, Голландии, Германии, Венгрии, Англии, Китая и др. [6]. Этой тематике был посвящен ряд докладов на последней Международной конференции по научно-технологическим индикаторам [7]. В настоящее время готовится к выходу монография М. Роко (с соавтором) — одного из отцов-основателей Национальной нанотехнологической инициативы (ННИ) США, внесшего значительный вклад в изучение развития и глобального воздействия нанотехнологии, в том числе с применением наукометрических индикаторов [8].

В России наукометрические исследования в сфере нанотехнологии начались достаточно недавно [9, 10]. В настоящей статье кратко показана структура гражданской наноауки в России; выполнены наукометрический анализ развития НИР и оценка позиций страны в области наноматериалов, относимых к фундаментальным “строительным блокам” нанотехнологии.

**1. Структура наноауки через призму данных РФФИ.
Библиометрические оценки российских публикаций по наноматериалам**

Научные фонды, как известно, реализуют идею равного доступа, конкуренции и участия самого научного сообщества в выборе исследовательских приоритетов. Финансируемые ими проекты являются неотъемлемой составляющей производства и распространения научного знания, поэтому

могут служить ценным источником информации для наукометрического анализа, формирования и реализации крупных целевых программ. По числу ежегодно финансируемых проектов и количеству их участников РФФИ — второй в мире после Национального научного фонда США (ННФ США) фонд. Данные его электронного банка включают: содержание проектов и ежегодные отчеты о ходе их выполнения (полные тексты); библиографическую информацию о публикациях по результатам проектов; учетные сведения об организациях, научных коллективах и отдельных ученых — участниках проектов. Путем статистической обработки банка данных можно рассчитать количественные и структурные параметры проводимых проектных исследований, показатели их результативности, а также характеристики инфраструктуры, обеспечивающей эти исследования. Кроме того, само содержание проектов представляет источник информации для отслеживания появления и динамики новых научных тематик, технологического форсайта.

Простейшим средством формализованного анализа контента проектов может служить частотный терминологический словарь. Для построения такого словаря и отбора “нанопроектов” нами использованы следующие ключевые термины:

- 1) слова с приставкой “нано”, за исключением слов “наносекунда”, “нанограмм”, “нанолитр”, “нано-планктон”, “нанокельвин”, “нанос” и некоторых других, не относящихся к избранной проблематике;
- 2) фуллерен, фуллерит, фуллерид;
- 3) квантовая точка, квантовая яма, квантовый проводник;
- 4) дендример.

Всего за период 1993—2006 гг. в названиях проектов РФФИ встретилось более 180 терминов, составивших терминологический словарь нанообласти, при общем количестве словоупотреблений 2032. К наиболее часто употребляемым (по числу раз) терминам относятся:

наноструктура	— 380;
фуллерен	— 145;
наночастица	— 142;
квантовая точка	— 125;
квантовая яма	— 118;
нанокристаллический	— 104;
наноразмерный	— 104;
нанокompозит	— 86;
наноструктурный	— 57;
нанотрубка	— 56.

До 1997 г. термин “фуллерен” был самым часто употребляемым, а термин “наночастица” вышел на третье место в 2005 г., обогнав по частоте употребления термины “квантовая яма” и “квантовая точка”. В последние три года (2004—2006 гг.) по сравнению с предыдущим периодом (1993—2003) значимо возросла частота употребления терминов: “наносистема”, “наноматериал”, “нанодисперсный”, “наночастица” и, наконец, самого слова “нанотехнология”; напротив, сократилась частота употребления таких терминов, как “фуллерен”, “дендимер”, “квантовая яма”, “квантовая точка”. За 2004—2006 гг. в словарь проектов РФФИ было введено около 50 новых “нанотерминов”. Некоторые из них относятся к обозначению отрасли или раздела науки: “наномедицина”, “наномеханика”, “наноминералогия”, “нанофотоника”. Большинство же имеет техническую и технологическую направленность: “нааноагрегат”, “нааноустройство”, “нааноприбор”, “наанодвигатель”, “наанозонд”, “нааноробот”, “наанотранзи-

стор”, “нааноэмиттер”, “наанофабрикация”, “наанотестинг” и др. Сказанное свидетельствует о расширении границ и тематических сдвигах в проводимых исследованиях, а также о начавшемся переходе от нанонауки к нанотехнологии.

Вообще же терминологический мониторинг (в том числе отслеживание появления новых терминов, отражающих интерес к вновь открытому объекту или явлению) в быстро развивающейся междисциплинарной научной области может иметь практическую пользу. Так, весьма популярной в последние годы становится тематика “нааноожидкостей”: количество публикаций по этой теме возрастает особенно быстро после двух публикаций в журнале “Nature” [11, 12]. Теме “nanofluid” посвящено полтора десятка проектов, выполняемых по грантам ННФ США [13]. В БД РФФИ найден лишь один проект по совместному конкурсу РФФИ и Нидерландского общества научных исследователей, хотя известно, что работы, в частности, по магнитоуправляемым нааноожидкостям, в России проводятся. К числу терминов, встречающихся в последнее время с возрастающей частотой (и не вошедших в словарь РФФИ), относятся: “наанокольцо” (“nanoring”); “нааноструя” или “нааносопло” (“nanojet”); “наанобиокомпозит” (“nanobiocomposite”) и некоторые другие. Таким образом, даже словарные сопоставления способны давать информацию для дальнейшего экспертного рассмотрения и возможных корректировок научных программ. Дальнейший лингво-статистический анализ с использованием полнотекстовых отчетов по проектам позволит извлекать все более полную и точную информацию о тематической структуре проводимых исследований. Следует, однако, отме-

титель, что формализованный характер рассмотренного подхода требует во всех случаях более строгой проверки и обоснования его результатов.

На основании ключевых терминов, содержащихся в названиях, выделено 1857 проектов, профинансированных РФФИ в 1993—2006 гг. В выполнении отобранных “нанопроектов” РФФИ за весь период принимали участие свыше 6800 исследователей. Участниками проектов, стартовавших в 2005 и 2006 гг., являлись 4160 человек, большинство из которых продолжают работу и сейчас. Они образуют 646 тематических научных групп и выполняют проектные исследования в 187 организациях². По количеству выполняемых исследовательских проектов лидируют:

Московский государственный университет (вместе с НИИ) — 62;

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (СПб.) — 45;

Институт физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск) — 21;

Санкт-Петербургский государственный университет (вместе с НИИ) — 21;

Институт проблем химической физики РАН (п. Черноголовка) — 16;

Институт физики твердого тела РАН (п. Черноголовка) — 16;

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (г. Новосибирск) — 15;

Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород) — 14;

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (Москва) — 13;

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва) — 13 проектов

Вообще же 58,8% общего числа “нанопроектов”, стартовавших в 2005—2006 гг., приходилось на долю

институтов РАН; 35,4% — на долю вузов (включая МГУ); 9,4 % — на долю государственных научных центров и отраслевых НИИ; 2,9% — на долю прочих (включая коммерческие) организаций. Такова в целом институциональная структура фундаментальной наноауки в гражданском секторе России.

Возрастная структура сообщества исследователей — весьма информативный показатель для оценки перспектив развития научной области. Средний возраст 4160 ученых, работающих в нанообласти по грантам РФФИ, равнялся в 2006 г. 44,3 лет, их возрастное распределение представлено на рис. 1. Среди особенностей возрастной кривой можно отметить: абсолютный “пик” в районе 26 лет; достаточно длинный послепенсионный “хвост”, (который за 8 последующих лет может, к тому же, “потяжелеть” с 21 до 40% численности данного контингента); низкую долю наиболее продуктивных возрастных групп. Привлекателен “молодежный пик”, в основе которого, вполне вероятно, лежит демографический фактор: высокая рождаемость в России на рубеже 1970—1980-х годов. Однако формирование этих возрастных когорт происходило в период значительного падения общественного престижа науки, поэтому мотивации их прихода в науку требуют изучения. По нашему наблюдению, из более 1800 российских участников “фуллеренового бума” в период 1991—2003 гг., включая научную молодежь, число оставшихся в стране активных и мотивированных исследователей составило в 2003 г. около 1/5. Следует добавить, что “фуллереновый бум” имел

² Имеются в виду организации, через которые осуществляется финансирование проектов; для проекта РФФИ допускается более одной организации финансирования.

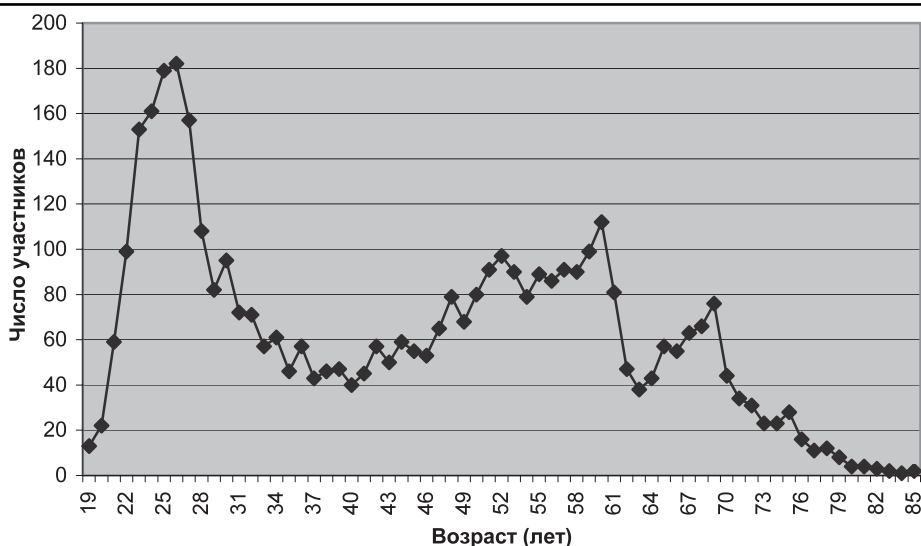


Рис. 1. Возрастное распределение участников “нанопроектов” РФФИ, начавшихся в 2005—2006 гг.

хорошую финансовую поддержку со стороны российского правительства. Длительные наблюдения за возрастной структурой грантополучателей РФФИ подтверждают, что “молодежный пик” куда-то растворяется, слабо подпитывая следующую возрастную группу зрелых исследователей [14]. Если учесть, что в дальнейшем (к 2015 г.) благоприятный демографический фактор сменит знак, а международная конкуренция за привлечение талантливых молодых ученых неизбежно обострится, будет не просто обеспечить развитие нанотехнологии в нашей стране высококвалифицированными исследователями.

Уже приведенный фрагмент частотного словаря свидетельствует, что большая часть исследовательских проектов РФФИ направлена на изучение наноматериалов. Далее рассмотрим те из них, которые относят к наномасштабным “строительным блокам”: наночастицы, квантовые точки, фулле-

рены, углеродные нанотрубки (УНТ), дендримеры. К ним проявляется повышенный исследовательский интерес в мире, а по количеству ежегодно выдаваемых американских “нанопатентов” все они, за исключением дендримеров, входят в лидирующую пятерку [15], что может означать близкое начало коммерческих приложений.

В силу массовости журнальные публикации наиболее ценны для анализа масштабов, структуры и источников развития исследований. В БД SCI — базе данных номер один в наукометрии — за период 1991—2003 гг. найдено свыше 40 тыс. публикаций (статей, писем, обзоров, материалов конференций), посвященных рассматриваемым типам наноматериалов.³ На рис. 2 сразу видно отличие общей динамики роста публикационной активности отечественных и зарубежных ученых: в первом случае это кривая, характеризующаяся насыщением, во втором — экспонента. Продолжение данной тенден-

³ Поиск производился по ключевым словам, содержащимся в названиях публикаций.

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, %	Доля 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	14064	11,44	73,8	5,7
Нанотрубки	6951	3,88	79,3	11,9
Дендримеры	2708	3,43	71,0	10,1

ции может означать сокращающийся вклад России в эту быстро растущую область мировой наноауки. Интересно, что показатели воздействия (цитируемость) отечественных работ по наноматериалам (см. таблицу) были выше аналогичных общих показателей для таких отраслей науки, как физика (процент цитированных работ — 53,1; среднее число ссылок — 3,04) и химия (процент цитированных работ — 33,4; среднее число ссылок — 0,95) за сопоставимый период [16].

Соотношение количества грантов, выданных РФФИ и ННФ США, на исследования по каждому из перечисленных типов наноматериалов составляет: для фуллеренов — 1,88; для квантовых точек — 1,02; для дендримеров — 0,57; для наночастиц — 0,40; для нанотрубок — 0,35.⁴ Их распределение по годам представлено на рис. 3—7. Интересно, что РФФИ начал финансировать исследования дендримеров даже раньше, чем ННФ, однако именно здесь средняя величина амери-

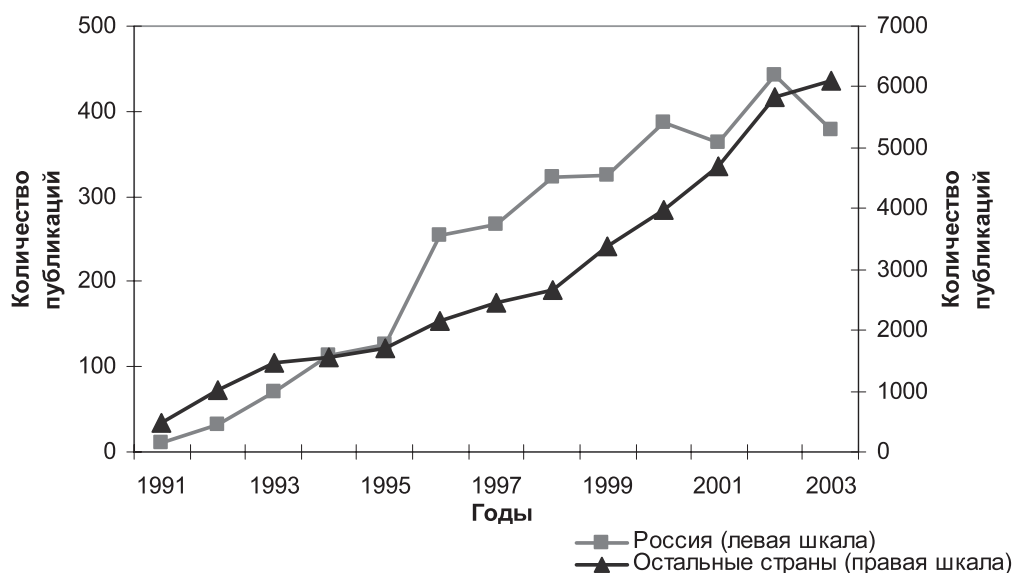


Рис. 2. Динамика публикационной активности в области изучения наноматериалов (наночастицы, квантовые точки, фуллерены, нанотрубки, дендримеры)

⁴ Следует отметить, что средний размер гранта российского и американского фондов различаются в десятки раз.

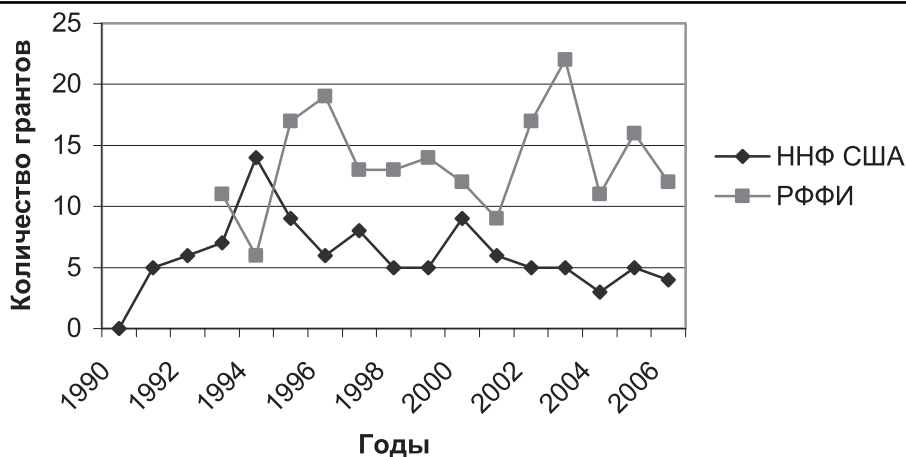


Рис. 3. Количество выданных грантов на исследования важнейших типов наноматериалов: фуллерены

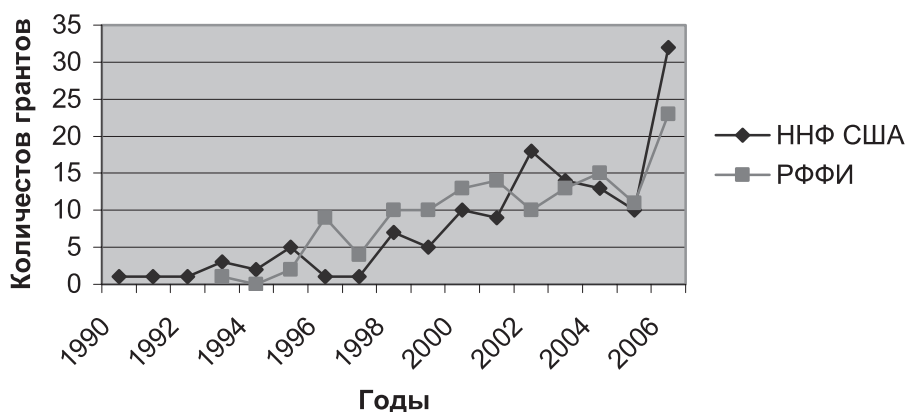


Рис. 4. Количество выданных грантов на исследования важнейших типов наноматериалов: квантовые точки

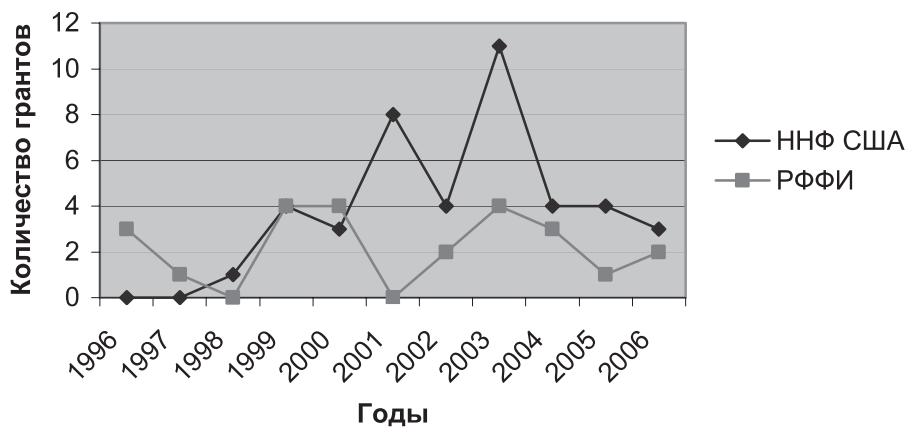


Рис. 5. Количество выданных грантов на исследования важнейших типов наноматериалов: дендримеры

канского гранта (более 331 тыс. дол.) самая высокая среди всех пяти типов исследуемых объектов [13]. Можно отметить, что количество стартующих проектов по наночастицам, нанотрубкам, квантовым точкам в США заметно возросло после принятия ННИ, чего нельзя сказать о фуллеренах.

Очевиден контраст в грантовой поддержке обоими фондами исследований двух родственных углеродных наноструктур: фуллеренов (см. рис. 3) и УНТ (см. рис. 7). Вообще, по мнению Э. Осавай⁵ с соавтором, если бы не было открытия фуллеренов в 1985 г. и УНТ в 1991 г., то появление нанотехнологии могло быть отсрочено по крайней мере на несколько десятилетий. Воздействие этих открытий было столь большим, что фуллерены и УНТ продолжают занимать главные позиции в международных исследованиях спустя уже долгое время после того, как на государственном уровне были приняты нанотехнологические инициативы [17]. Оценим мировые тенденции и место России в этих исследованиях и применении их результатов.

2. Наукометрический анализ и оценка развития НИР в области углеродных наноструктур

Открытие фуллеренов (новой формы существования молекулярного углерода, наряду с алмазом и графитом) в 1985 г. группой ученых из США и Великобритании [18] стало прорывным открытием конца XX века, удостоенным в 1996 г. Нобелевской премии по химии. После того как был найден простой способ получения фуллеренов (1990), а также обнаружена сверхпроводимость в соединении со щелочными металлами (1991), изучение фуллеренов и их производных превратилось в новое быстро развивающееся научное направление с широким спектром практических выходов (рис. 8). Столь высокий интерес обусловлен необычными свойствами фуллеренов, открывающими широкие возможности их прикладного использования. Согласно статистике, полученной из БД SCI, с 1991 по 2003 г. в мировом “фуллереновом проекте” приняли участие более 75 стран, расположенных на всех

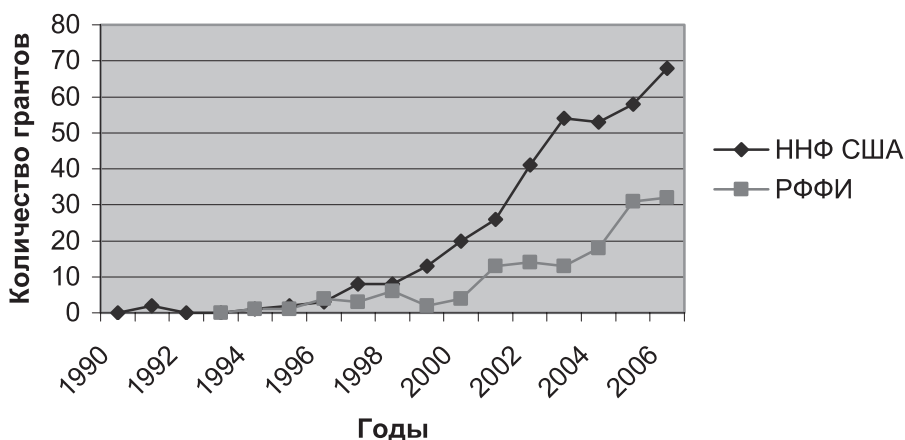


Рис. 6. Количество выданных грантов на исследования важнейших типов наноматериалов: наночастицы

⁵ Углеродная молекула C_{60} эвристически (без каких-либо расчетов) была предсказана японским ученым Э. Осавой в 1970 г.

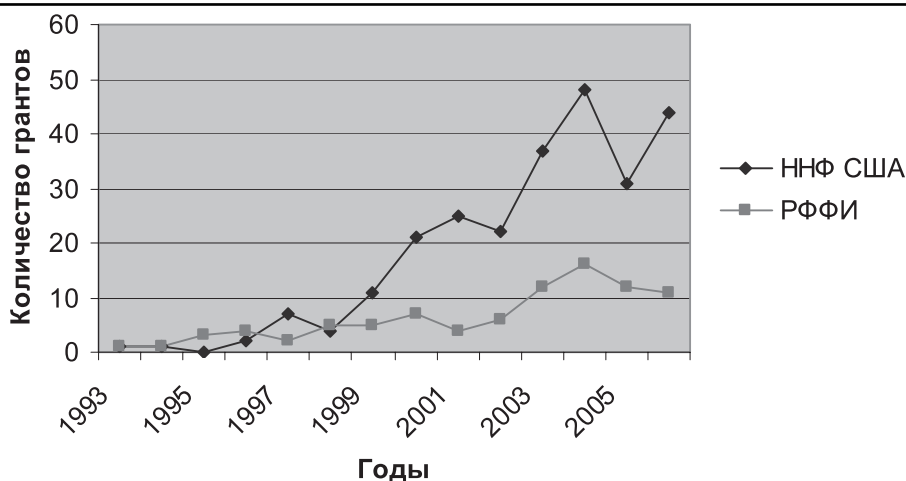


Рис. 7. Количество выданных грантов на исследование важнейших типов наноматериалов: нанотрубки

континентах мира. В десятке лидеров по публикационному вкладу: США, Япония, Россия, Китай, Германия, Франция, Великобритания, Италия, Швейцария и Индия.

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 годов. (Институт элементоорганических соединений АН СССР)⁶. Однако полномасштабное участие отечественных ученых в фуллереновой про-

блеме относится к началу 1990-х годов. Важную роль в институционализации области, наряду с поддержкой РФФИ, сыграло программное направление “Фуллерены и атомные кластеры” в рамках ГНТП “Актуальные направления в физике конденсированных сред” (1993). В результате удалось сформировать национальное сообщество исследователей, научные коллективы (в Москве, Санкт-Петербурге, Черноголовке, Троицке, Нижнем Новгороде, Новосибирске, Екатеринбурге, Красноярске, Уфе), равноправно сотру-

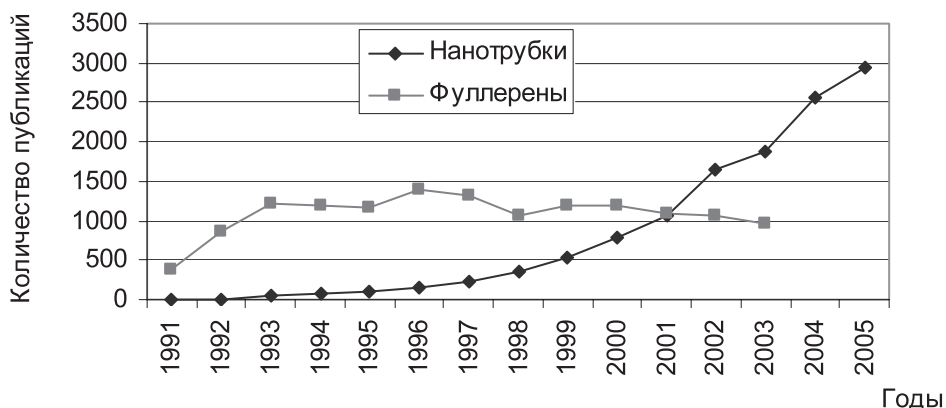


Рис. 8. Общее число публикуемых в мире работ в области нанотрубок и фуллеренов (согласно БД SCI)

⁶ Более подробно об этом событии и его участниках можно прочитать в [19].

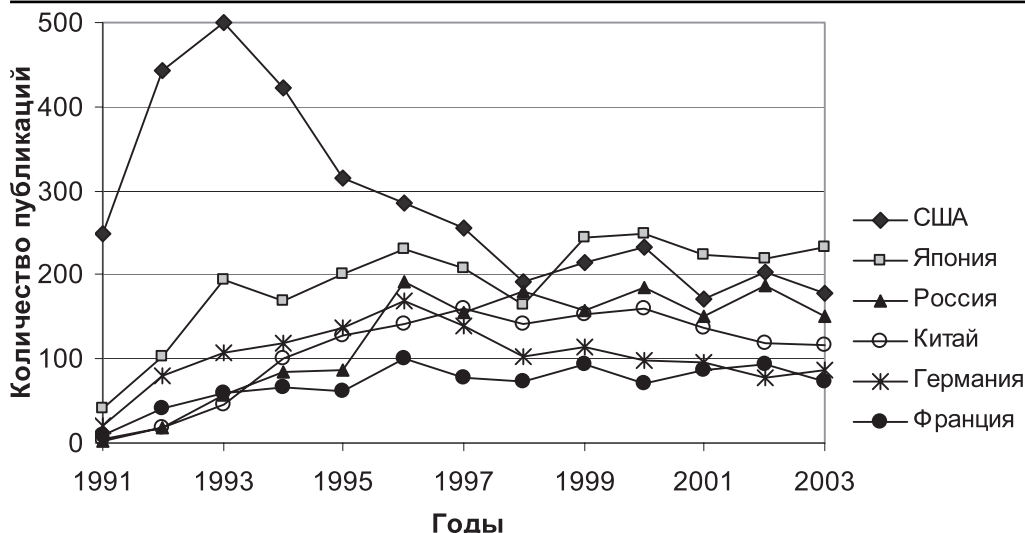


Рис. 9. Количество публикаций по фуллеренам (БД SCI), ежегодно производимых разными странами

начающие с зарубежными коллегами. По количеству публикуемых работ в данной области Россия вышла на третье место в международной гонке (рис. 9). О степени интеграции в мировую науку о фуллеренах говорит тот факт, что более 26% журнальных публикаций за рассматриваемый период написано российскими учеными в соавторстве с их зарубежными коллегами. Россия сотрудничает со всеми главными участниками мировой научной гонки в этой области, за исключением Китая; наиболее тесны соавторские связи с Германией, Великобританией и США. Самые высокие показатели публикационного вклада у МГУ и группы академических НИИ: Института проблем химической физики (п. Черноголовка), Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (СПб.), Института высокомолекулярных соединений (СПб.), Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова (Москва), Института физики твердого тела (п. Черноголовка).

Исследования сопровождались прикладными разработками, доста-

точно высокой изобретательской активностью (рис. 10). Анализ показал, что грантовое финансирование фундаментальных исследований способствовало созданию отечественной изобретательской базы в области фуллеренов на начальном этапе. Для успешных российских разработок характерна высокая наукоемкость, изначальная направленность на опережение, а не повторение зарубежных результатов. К приоритетным (по уровню цитируемости, наличию ключевых патентов) можно отнести следующие российские исследования и разработки:

- ❖ работы по ультратвердому и сверхтвердому фуллериту C_{60} (ФГУ “Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов” и Институт спектроскопии РАН, г. Троицк). Приоритет российских ученых в области синтеза и применения сверхтвердого материала на основе фуллерита C_{60} был закреплен четырьмя российскими и американским патентом [20];
- ❖ изобретенный учеными из НИИ лазерной физики (СПб.) фуллерен-

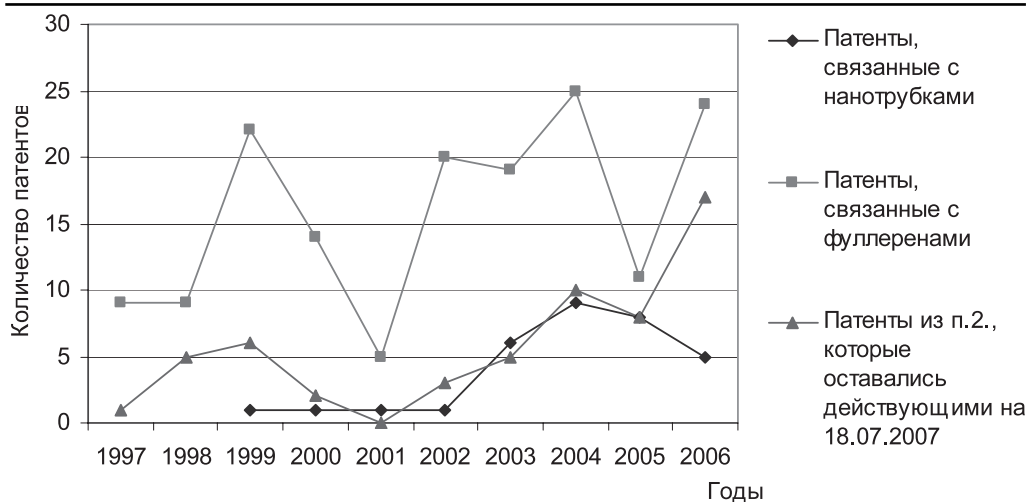


Рис. 10. Динамика выдачи российских патентов на изобретения, связанные с нанотрубками и фуллеренами

кислород-йодный лазер [21] может быть использован в лазерной энергетике для передачи солнечной энергии на большие расстояния с высоким КПД. Кроме того, ведется изучение перспектив его применения для лечения рака и вирусных инфекций;

- ❖ хорошим потенциалом воздействия обладает статья российских ученых (Физико-технический институт РАН, СПб., и Институт физики высоких давлений РАН, г. Троицк) и их коллег из Швеции, Германии и Бразилии, опубликованная в журнале “Nature” в 2001 г. [22]. 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.

Мировой “фуллереновый бум” привел к открытию углеродных нанотрубок: сначала многослойных в 1991

г. [23], затем однослойных в 1993 г. [24, 25]. По уникальности свойств и потенциалу применений УНТ превосходят фуллерены, поэтому сразу же привлекли широкий исследовательский интерес в мире, который стал интенсивно нарастать после открытия в 1992 г. метода получения нанотрубок в граммовых количествах. Начиная с 2002 г. акцент в изучении углеродных наноструктур переместился с фуллеренов на УНТ (см. рис. 8). Свой публикационный вклад в это направление внесли представители 72 стран. В десятке лидеров: США, Китай, Япония, Южная Корея, Германия, Франция, Великобритания, Россия, Тайвань, Бельгия.

После первых работ, принадлежащих японцам и россиянам, лидерство по количеству публикаций уверенно захватили ученые из США. В последние годы реальную конкуренцию им составляют только представители Китая (рис. 11). 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 мире. Россия с 1999 г. по количеству ежегодных публи-

каций занимает не выше 8-го места, однако и здесь нас энергично в последние годы настигает Тайвань. Таким образом, картина межстрановой динамики исследовательских усилий в области фуллеренов и нанотрубок довольно сильно отличается.

Приведем другие библиометрические показатели. Доля публикаций по нанотрубкам, имеющих международное соавторство, уменьшилась с 22,2 % в 1992—2002 гг. до 18,6% в 2003—2005 гг. Самая низкая за последние три года наблюдения доля публикаций с международным соавторством у Китая (16,9%) и Тайваня (17,8%). Для России этот показатель составляет 34,3%, для США — 24,8%. Наша страна имела соавторские связи со всеми опережающими ее по числу публикаций странами, причем наиболее частые со США, Великобританией и Германией. Из 3390 мировых публикаций по нанотрубкам за 1992—2001 гг. к 2003 г. было процитировано 88,8% при среднем числе ссылок на одну публикацию 31,6. Для России аналогичные показатели ниже: 80,2% и 14,5 ссылок соответственно. Характерно, что международное соавторство повышает показатели цитиру-

емости российских публикаций с 78,7 до 83,3% для первого показателя и с 8,7 до 25,2 ссылок — для второго. Процент процитированных публикаций ученых из США составил 87,4, а среднее число ссылок на одну публикацию — 48,8. Из состава работ, процитированных 100 и более раз, 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 публикация с российским соавторством 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. количество публикаций американских ученых по УНТ впервые превысило количество публикаций по фуллеренам, а в 2003 г. разрыв был уже в разы.

Проведенные исследования показали, что благодаря своим феноменаль-

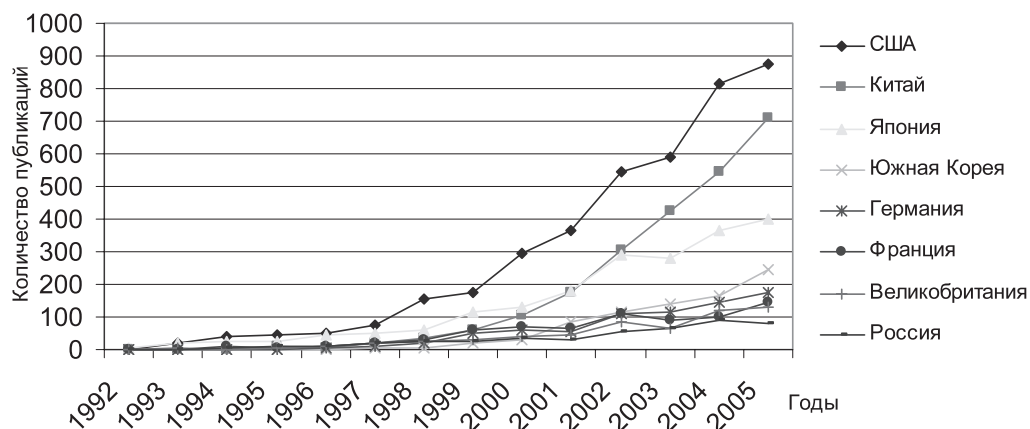


Рис. 11. Количество публикаций по нанотрубкам, производимых разными странами(БД SCI)

ным свойствам⁷ и их сочетанию УНТ обладают широчайшим потенциалом применений: сверхпрочные волокна, пряжа, ткань; композиционные материалы; чипы памяти; логические схемы; наносенсоры; полевые эмиттеры; наноэлектромеханические системы (НЭМС); искусственные мускулы; топливные элементы; хранилища для газов; солнечные батареи; ион-литиевые батареи; 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. Это не полный и далеко не закрытый список возможных применений УНТ. Такая “всеядность” нанотрубок, а также способность улавливать важнейшие тенденции в электронике (стремление к дальнейшей миниатюризации и мобильности), энергетике (переход к альтернативным источникам энергии), фармацевтике и медицине (создание новых типов лекарств и методов лечения) делает их стратегическим материалом для нанотехнологии.

Высокий коммерческий потенциал УНТ породил активное стремление университетов, правительственных лабораторий, исследовательских подразделений корпораций к установлению широкой патентной защиты. Поиск в БД US PTO показал, что за период с 1994 по 2007 гг. Патентным ведомством США выдано 953 патента на изобретения, связанные с получением и применением нанотрубок (около 11% общего числа найденных

в этой базе “нанопатентов”), причем количество ежегодно выдаваемых патентов непрерывно возрастало. В России начиная с 1999 по 2007 г. выдано всего 50 УНТ-патентов, что уступает фуллеренам по количеству более чем в три раза (см. рис. 10). Если оборотной стороной бурного роста патентования в США стали “патентные дебри”, то в России актуальны пока другие проблемы: необходимость стимулирования изобретательской активности в этой перспективной области, изыскание средств на поддержание действия патентов, противодействие утечке патентоспособных идей и др.

В настоящее время в мире формируется научно-промышленный комплекс для крупномасштабной коммерциализации углеродных наноматериалов и продуктов на их основе. Созданы мощности для многотоннажного производства фуллеренов. Интегральные мощности по производству многослойных УНТ оцениваются в 300, а однослойных УНТ — 7 тонн в год. На рынке уже присутствуют продукты, произведенные с использованием УНТ, например спортивный инвентарь. Американская компания “Nantero” планировала выпустить на рынок уже в конце 2007 г. первую компьютерную память на основе УНТ (с энергонезависимостью, высокой скоростью чтения / записи, низким энергопотреблением) по сопоставимым с конкурирующими вариантами ценам. Компания “Unidym” (один из лидеров в производстве и применении УНТ) объявила, что в апреле 2008 г. состоялся первый полет самолета, в фюзеляже которого были использованы УНТ.

⁷ УНТ обладают рекордными механическими характеристиками, уникальными тепло- и электропроводностью, оптическими и магнитными свойствами. В зависимости от геометрических параметров они могут иметь металлическую или полупроводниковую проводимость [26].

Добавим, что практически во всех нанотехнологических дорожных картах применениям нанотрубок отводится важная роль.

В России созданы предпосылки для промышленного освоения фуллеренов. Ряд отечественных разработок доведен до готовых технологий: создания и производства сверхтвердых материалов на основе фуллеренов; наномодифицирования железоуглеродистых расплавов; гидрофобизации мрамора и мрамороподобных известняков; получения нелинейно-оптических сред для ограничителей мощности лазерного излучения и др. Есть возможность при массовом спросе организовать промышленный выпуск фуллеренов, например в Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде. В отсутствие же такого спроса применение фуллеренов носит пока ограниченный характер, например в качестве катализаторов при синтезе алмазов из графита, модификаторов конструкционных углепластиков, для изготовления элементов высокоточных приборов.

Значительно хуже дела с внедрением УНТ. В России нет собственно производства нанотрубок: делаются попытки наладить производство многослойных УНТ в Тамбове; чистые же однослойные УНТ (пригодные для наиболее высокотехнологичных приложений) получают в лабораторных условиях десятками граммов. Этот материал недоступен для многих отечественных научных лабораторий из-за дороговизны и ограничений на внешние поставки (как материал двойного применения), что, очевидно, тормозит исследования. Учитывая, что УНТ включены в состав приоритетных направлений развития nanoиндустрии в России, необходимо, опираясь на соб-

ственные силы, наладить их массовое производство и в первую очередь обеспечить качественными нанотрубками научно-исследовательский сектор. В Институте проблем химической физики РАН на основе электродугового процесса создана перспективная технология (лабораторный вариант), которая при масштабировании позволяет производить чистые однослойные УНТ по цене около 60—100 дол. за 1 г. [27]. Это, по оценке разработчиков, делает экономически рентабельным их применение в электронике, оптике, производстве топливных элементов. Создание отечественной промышленной технологии представляется целесообразным, поскольку российским рынком интересуются зарубежные компании. Так, два российских патента на получение нанотрубок выданы двум ведущим мировым производителям УНТ: “Hyperion Catalysis International” (США) и “Rosetter Holdings” (Кипр). С другой стороны, трудности коммерциализации научных достижений в России приводят к передаче отечественных технологий через зарубежное патентование. Высокоэффективная полевая эмиссия электронов с УНТ впервые была обнаружена в России, о чем группа исследователей из Института радиотехники и электроники РАН в 1994 г. доложила на 7-й Международной конференции по вакуумной микроэлектронике. Сейчас это признанный факт, и эмиссия с УНТ стала применяться в различных приборах. На 4-й 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 “СоруTele Inc.” (Нью-Йорк, США). В 2003 г. на разработку дисплея был выдан американский патент [28], при этом российская компания выступила донором технологии, а американская, обладающая широкими рыночными и сбытовыми возможностями, — реципиентом. 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 в качестве информационного и навигационного оборудования автопроизводители в России. Поставщиком УНТ выступает азиатская компания.

Кратко подытоживая раздел, отметим, что по количеству выполняемых исследовательских проектов (БД РФФИ), оценке публикационного вклада России (БД SCI), количеству запатентованных изобретений (БД Роспатента) фуллерены превосходят УНТ. В значительной степени это цена целевой государственной поддержки, 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 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 (8-е место по сравнению с 3-м в фуллеренах), ухудшило возможность восприятия и обмена передовыми научными результатами с лидирующими странами (снизился уровень представительства россиян на международных конференциях), сдерживает участие российских ученых в поиске более экономичных способов массового производства УНТ.

Заключение

Нанотехнология — появляющаяся общецелевая технология, которая совместно с другими конвергентными технологиями обещает стать основой формирования шестого технологического уклада. Благодаря своей специфике (наукоемкость, междисциплинарность, множественность приложений и т.д.), а также размерам вкладываемых ресурсов и масштабам ожидаемых выгод она вызывает значительный интерес со стороны ученых разных профилей, включая науковедов, экономистов, специалистов по прогнозированию и управлению. Понимание процессов развития нанотехнологии в современном глобализованном мире тесно связано с возможностью их измерения. Официальная статистика нанотехнологию либо совсем не идентифицирует, либо относит к различным классификационным рубрикам, откуда ее невозможно идентифицировать точно. Не в последнюю очередь поэтому столь широкое распространение получили наукометрические исследования, имеющие как национальную,

так и международную направленность. Обладая объективностью и большей сопоставимостью, наукометрические индикаторы способны эффективно дополнять технологию “Форсайт”, ставшую в последнее время популярной при прогнозировании перспектив развития нанотехнологии.

Нanomатериалы — важная часть нанотехнологии, а углеродные наноматериалы для нее значимы в той же степени, как кремний для электроники. Мировой “фуллереновый бум” стал своеобразным прологом для бума нанотехнологического, более того, сами фуллерены и открытые после них УНТ остаются важнейшими материалами для эволюционного этапа развития нанотехнологии. Для России его уроки поучительны еще и тем, что в экстремальных для науки условиях переходного периода удалось сохранить достойный уровень, подтверждаемый наукометрическими показателями. Однако были и негативные моменты.

Новая стабильная форма молекулярного углерода была открыта в значительной степени случайно, в результате ненаправленного научного поиска. Вторым актом открытия по существу стало получение в 1990 г. учеными из Германии и США фуллерена C_{60} в граммовом количестве, позволяющем проведение химических анализов. В результате уже через два года число публикаций по фуллерену превысило тысячу в год, причем по этому показателю он обошел ферроцен и карборан — две другие выдающиеся молекулы 20-го столетия. Тем не менее, более 20 лет интенсивных исследований и разработок, проведенных во всем мире, пока не дали сколь-либо мас-

штабного экономического результата. Это означает, что в нанотехнологии путь от фундаментального открытия до его эффективного практического применения (или от исследования до коммерциализации) может быть объективно весьма длительным.

Достижения в получении нового научного знания — важнейший фактор производства потенциальных нанотехнологических инноваций. Именно здесь негативные проявления российской научной политики наиболее болезненны. Через 20 лет после опубликования российскими учеными опережающей статьи с расчетным обоснованием устойчивости молекулы C_{60} в форме усеченного икосаэдра и год спустя после того, как мировой поток публикаций по фуллеренам уже достиг своего пика, Миннауки РФ было утверждено программное направление “Фуллерены и атомные кластеры”, оказавшееся, впрочем, весьма эффективным.⁸ Российское научное руководство “не заметило” явно обозначившийся перенос акцентов лидерами с изучения фуллеренов на нанотрубки. В результате по количеству публикаций мы в разы уступаем Китаю, позднее нас начавшему исследования по УНТ, но оказавшему целевую государственную поддержку этому перспективному направлению.

Несмотря на более высокие показатели цитируемости, доля российских статей в мировом массиве публикаций по наноматериалам снижается. Это очевидное следствие общего процесса сжатия научно-технической сферы, для которого наиболее критичен, по нашему мнению, кадровый аспект. Любая из утраченных мате-

⁸ Нельзя не отметить, что положительным фактором в поддержке российских исследований в период трудных 1990-х годов стал открытый характер науки о фуллеренах, создавший основу для широкой международной кооперации и возможность получения грантов зарубежных научных фондов.

риальных составляющих научно-исследовательской деятельности при улучшении экономической ситуации может быть создана вновь достаточно быстро; потеря же соответствующим образом подготовленных национальных научных кадров не может быть восполнена за короткий период, даже при наилучших условиях на это уходят десятилетия. Возрастная структура наиболее активного ядра российских исследователей (см. рис. 1) говорит о серьезном кадровом барьере для успешной реализации национальной нанотехнологической программы. Широкая реклама способна дать лишь краткосрочный эффект в деле привлечения и закрепления молодежи даже в “модных” научных областях. Так, по свидетельству одного из заведующих кафедрой Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, если в 2007 г. конкурс на новую специальность “Нанотехнологии” составлял 3,5 человека на место, то в 2008 г. едва удалось заполнить 15 мест.

Реагирующий характер научной политики, часто с большими запаздываниями, привел к тому, что и национальную программу по нанотехнологии мы приняли после того, как практически все ведущие страны уже

сделали это. ГК РОСНАНО на развитие инновационной нанотехнологической деятельности выделены значительные средства, однако она не имеет права инвестировать их в фундаментальные исследования. Вместе с тем, как показал пример фуллеренов, без активной длительной поддержки фундаментальных исследований невозможна генерация потенциальных нанотехнологических инноваций. Кроме того, инновационный процесс, как правило, не линеен, с взаимными обратными связями между нанонаукой и нанотехнологией. Разрыв инновационного цикла способен негативно повлиять на эффективность деятельности государственной корпорации, а многие из перспективных идей могут остаться не доведенными до рыночного продукта.

В завершение отметим, что многие просчеты научного управления стали следствием недостатков организации системно-аналитической поддержки принятия решений, в которой наукометрические методы играют важную роль. Отсутствие в России журналов, подобных “Scientometrics” или “Research Policy”, затрудняет постановку и обсуждение проблем развития нанотехнологии, лишь частично затронутых в настоящей статье.

1. Третьяков Ю.Д. Проблема развития нанотехнологий в России и за рубежом // Вестн. РАН. — 2007. — Т. 77, № 1. — С. 3—10.
2. Андриевский П.А. Научный задел России перед началом нанотехнологического бума // Наоиндустрия. — 2007. — № 3.
3. *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).
4. Braun T., Schubert A., Zsindely S. Nanoscience and Nanotechnology on the Balance // *Scientometrics*. — 1997. — Vol. 38, № 2. — P. 321—325.
5. Meyer M., Persson O. Nanotechnology — Interdisciplinarity, Patterns of Collaboration and Differences in Applications // *Ibid.* — 1998. — Vol. 42, № 2. — P. 195—205.
6. *Scientometrics*. — 2007. — Vol. 70, № 3.
7. *10th International Conference on Science and Technology Indicators*. — Vienna, 2008.

8. *Chen H., Roco M.C.* Mapping Nanotechnology Innovations and Knowledge: Global and Longitudinal Patent and Literature Analysis // Series: Integrated Series in Information Systems. — Vol. 20 (forthcoming).
9. *Information Resources for Evaluating the Development of Research Direction — “Fullerenes” / A.I.Terekhov, V.M.Efremenkova, I.V.Stankevich, N.V.Krukovskaya, A.A.Terekhov // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. — 2006. — Vol. 14, № 2—3. — P. 579—584.*
10. *Bionanotechnology: A Bibliometric Analysis Using Science Citation Index Database / L.F.Borisova, N.S.Bogacheva, V.A.Markusova, E.E.Suetina // Scientific and Technical Information Processing. — 2007. — Vol. 34, № 4. — P. 212—218.*
11. *Chaudhury M.K.* Complex Fluids: Spread the Word about Nanofluids // Nature. — Vol. 423. — P. 131—132 (8 May 2003).
12. *Wasan D.T., Nikolov A.D.* Spreading of Nanofluids on Solids // Ibid. — P. 156—159 (8 May 2003).
13. www.nsf.gov/awardsearch.
14. *Хроника распада / М.В.Алфимов, В.А.Минин, А.Н.Либкинд, А.И.Терехов, Л.М.Гохберг // Поиск. — 2003. — № 10. — С. 8—9.*
15. <http://nanowerk.com/spotlight/spotid=386.php>.
16. *Маришкова-Шайкевич И.В.* Вклад России в развитие мировой науки: библиометрическая оценка // Отечественные записки. — 2002. — № 7.
17. *Ozawa M., Osawa E.* Carbon Blacks as the source Materials for Carbon Nanotechnology // Carbon Nanotechnology / Dai L. (ed.). — Dordrecht: Elsevier, 2006. — Chapter 6. — P. 127—151.
18. *C₆₀:Buckminsterfullerene / H.W.Kroto, J.R.Heath, S.C.O'Brien et al. // Nature. — 1985. — Vol. 318. — P. 162—163.*
19. *Харгиттау И.* Откровенная наука. Беседы со знаменитыми химиками. — М.: УРСС, 2003. — 469 с.
20. 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.
21. Патент № 2181224 РФ. Способ получения генерации стимулированного излучения на атомах йода / Мак А.А., Данилов О.Б., Белоусова И.М. 10.04.2002.
22. *Magnetic carbon / T.L.Makarova, B.Sundqvist, R.Hohne et al. // Nature. — Vol. 413, № 6857. — P. 716—718.*
23. *Iijima S.* Helical Microtubules of Graphitic Carbon // Ibid. — 1991. — Vol. 354, № 6348. — P. 56—58.
24. *Iijima S., Ichihashi T.* Single-shell Carbon Nanotubes of 1—nm Diameter // Ibid. — 1993. — Vol. 363, № 6430. — P. 603—605.
25. *Cobalt-catalysed Growth of Carbon Nanotubes with Single-atomic-layer Walls / D.S.Bethune, C.H.Kiang, de Vries M.S. et al. // Ibid. — P. 605—607.*
26. *Харрис П.* Углеродные нанотрубы и родственные структуры. — М.: Техносфера, 2003. — 335 с.
27. *Крестинин А.В.* Проблемы и перспективы развития индустрии углеродных нанотрубок в России // Российские нанотехнологии. — 2007. — Т. 2, № 5—6. — С. 18—23.
28. 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.

Получено 04.12.2008

А.И.Терехов

Наукометричні індикатори для оцінки розвитку нанотехнологій: позиції Росії в галузі фундаментальних наноматеріалів

Показано структуру цивільної нанонауки в Росії, зроблено наукометричний аналіз розвитку НДР й оцінено позиції країни в галузі наноматеріалів.