

А.Н. ТЕРЕХОВ

Нанотехнологические перспективы России: от “нанобума” к объективным оценкам

В статье представлен краткий библиометрический анализ развития нанотехнологии в 1990–2009 гг. с оценкой позиций России. Значительное внимание уделено мировой научной гонке в области углеродных наноструктур как одному из центральных эпизодов в истории нанотехнологии и некоторым ее урокам для нашей страны. Показано, что серьезная деформация возрастной структуры научного сообщества, трудности в подготовке нового поколения исследователей для нанотехнологии становятся главным барьером для ее успешного развития.

Ключевые слова: нанотехнология, библиометрический анализ, углеродные наноструктуры, научная гонка, научные кадры, “утечка мозгов”.

The article provides a brief bibliometric analysis of the development of nanotechnology from 1990 to 2009, together with an assessment of Russia's position. Considerable attention is paid to the global scientific race in the field of carbon nanostructures as one of the central episodes in the history of nanotechnology and some of its lessons for our country. It is shown that a serious strain of the age structure of the scientific community, the difficulties in preparing a new generation of researchers for nanotechnology become a major barrier to its successful development.

Keywords: nanotechnology, bibliometric analysis, carbon nanostructures, scientific race, scientific personnel, brain drain.

Нанотехнология¹ – появляющаяся общецелевая технология, которая совместно с другими конвергентными (био-, инфо-, когно-) 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, в том числе науковедов и экономистов.

Точкой отсчета для развития нанотехнологии (НТ) принято считать знаменитую лекцию американского физика Р. Фейнмана перед собранием Американского физического общества в 1959 г., 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» (цит. по [Фейнман, 2002, с. 6]). Однако сам термин “нанотехнология” впервые применил японский

¹ На самом деле это “зонтичный” термин для технологий, осуществляющих манипуляцию веществом в нанодиапазоне (1–100 нм; 1 нм = 10⁻⁹ м).

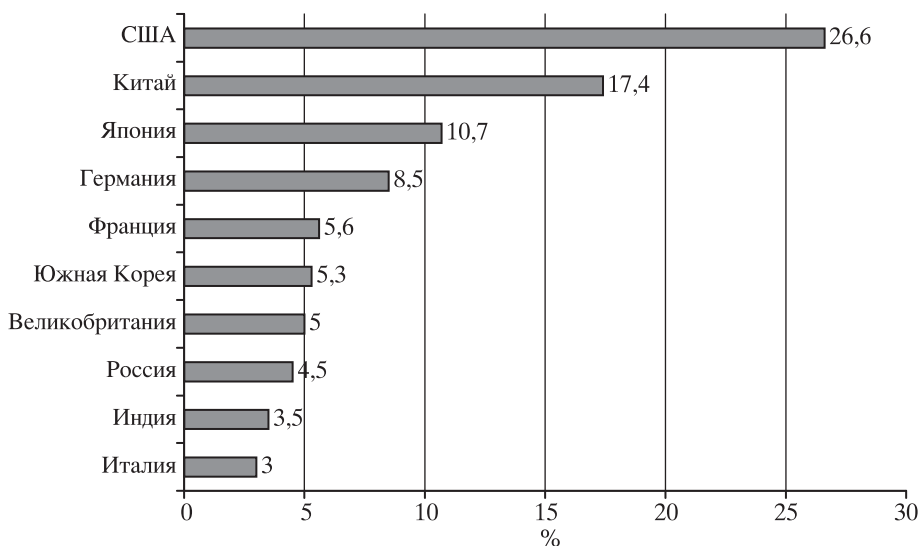


Рис. 1. Долевой вклад страны в массив нанопубликаций за период 1990–2009 гг.

ученый Н. Танигучи, касаясь способности обрабатывать материалы для электроники с нанометровой точностью [Taniguchi, 1974].

В развитии НТ условно можно выделить следующие этапы: первоначальные исследования (примерно до 1980 г.); возникновение НТ как технологии (1981–1990 гг. и до настоящего времени); разработка политики (1991–2000 гг. и до настоящего времени); государственная приоритизация НТ значительным числом стран (с 2001 г.). Рассмотрим библиометрические индикаторы развития нанотехнологии в период 1990–2009 гг.

Библиометрическая оценка исследований

Понимание процессов развития нанотехнологии тесно связано с возможностью их измерения. Официальная статистика пока не вполне справляется с этой задачей из-за сложности создания для НТ удовлетворительных классификационных систем. Не в последнюю очередь поэтому столь широкое распространение получили библиометрические исследования, имеющие как национальную, так и международную направленность (см., например, обзор [Huang, Notten, Rasters, 2008] и специальный выпуск журнала “Scientometrics” – 2007, № 3). В нашей стране подобные работы также проводятся [Зибарева, Зибарев, Бузник, 2010].

Для настоящего исследования исходная выборка получена путем поиска в базе данных (БД) SCI-Expanded (на платформе ISI Web of Knowledge) по ключевым словам, содержащимся в названиях публикаций². За период 1990–2009 гг. в указанной БД выделено 303 484 нанопубликации, в которых участвовали представители более 120 стран. На рисунке 1 представлена лидирующая десятка стран по вкладу в массив нанопубликаций. Растущая кривая (см. рис. 2) отражает усиление интереса отечественных ученых к данной области. Более того, внутренний ресурс развития позволил российской науке до 1997 г. даже увеличивать свой вклад в мировой научный выход в области НТ, несмотря на социально-экономический кризис 1990-х гг.

Однако затем произошел поворот, и этот вклад начал снижаться, что переместило страну с пятого места в мире в 1997 г. на десятое – в 2009 г. (см. рис. 2). Негативные

² Помимо традиционных терминов с приставкой “nano”, в состав поисковых введены термины: “fullerene”, “quantum dot”, “dendrimer”, “photonic crystal” и др. Напротив, исключены такие не относящиеся к делу термины, как “nanogram”, “nanosecond”, “nanoliter” и т.п.

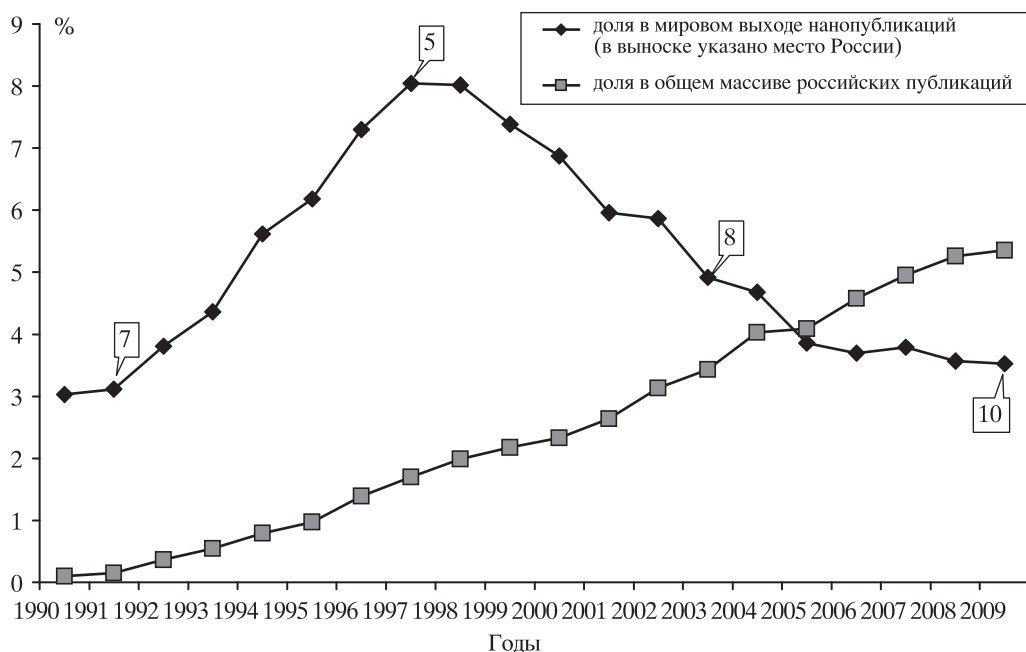


Рис. 2. Изменение доли российских нанопубликаций в мировом выходе и в общем массиве российских публикаций (БД SCI-Expanded).

тенденции стали следствием недостаточного внимания к науке в нашей стране и целевой поддержки приоритетных областей на фоне принятия многими странами в начале 2000-х гг. национальных программ развития НТ. Ситуацию не смог переломить даже значительный рост финансирования в связи с принятием в 2007 г. президентской инициативы “Стратегия развития наноиндустрии”. По количеству нанопубликаций в 2009 г. нас обошли уже Индия и Тайвань, занимавшие в 1997 г. 14-е и 15-е место.

При формировании и оценке научной политики часто важны показатели цитируемости. В рассчитанной на октябрь 2010 г. таблице страны расположены по убыванию кумулятивного показателя цитирования всех нанопубликаций с участием данной страны в БД SCI-Expanded за 1990–2008 гг. По этому показателю Россия на 13-м месте. Среднее же число ссылок на одну нанопубликацию (9,9) оставляет нас в четвертом десятке стран. Лидер по библиометрическим индикаторам – США: они имеют самый большой вклад (26,6 %) в массив нанопубликаций и, хотя по среднему числу ссылок на одну публикацию (31,3%) только третьи, по кумулятивному показателю цитирований всех публикаций превосходят остальной мир.

Интересны публикации с наивысшим показателем воздействия. Тысячу и более цитирований за рассматриваемый период имели 140 нанопубликаций. В числе их авторов (соавторов) – ученые из 15 стран. Наибольший вклад (103 публикации) за учеными из США. Далее следуют Великобритания (10), Нидерланды и Франция (по 8), Япония и Германия (по 7), Швейцария и Китай (по 4), Россия и Италия (по 3 публикации). На верхних строчках работы, посвященные открытию углеродных нанотрубок (Япония; 9864 ссылки) и фуллеренов (США и Англия; 6930 ссылок), а также методу изготовления массива кремниевых квантовых проводов (Англия; 5386 ссылок). На 9-м и 23-м месте – две работы по графену, опубликованные российскими учеными из Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (ИПТМ) РАН совместно с учеными из Англии в журнале “Science”, из Англии и Нидерландов в журнале “Nature” в 2004 и 2005 гг. На 38-м месте статья ученых из Уфимского государственного авиационного технического университета о создании объемных нано-

Средняя цитируемость публикаций по областям нанотехнологии и странам

Страна	Нанопубликации			
	все	по фуллеренам	по нанотрубкам	по графену
Весь мир	—	22,2	29,0	42,3
США	31,3	42,7	47,6	56,7
Япония	18,8	20,7	31,3	18,3
Китай	12,8	8,0	17,8	20,0
Германия	23,1	27,4	33,2	48,9
Великобритания	24,3	34,1	35,1	133,2
Франция	21,6	18,9	38,7	61,9
Южная Корея	13,8	14,6	17,4	15,7
Италия	18,6	26,1	24,5	16,3
Швейцария	32,8	33,8	54,0	47,9
Испания	19,3	23,0	26,8	39,1
Канада	20,4	21,9	17,6	30,0
Нидерланды	33,7	40,1	86,1	107,5
Россия	9,9	7,3	13,1	131,1

структурных материалов методами интенсивной пластической деформации, опубликованная в 2000 г.

В тематической структуре публикаций с наивысшим воздействием преобладают работы, посвященные углеродным нанотрубкам (27%). Далее следуют полупроводниковые наноструктуры (17%), нанобиотехнология и наномедицина (12%). Это отражает главные исследовательские интересы мирового нанотехнологического сообщества в рассматриваемый промежуток времени.

К приоритетам последнего периода относится графен. Достаточно сказать, что из десяти высокоцитируемых нанопубликаций с 2005 г. ему посвящены три самые высокоцитируемые, а статья с сообщением о его открытии процитирована в 2010 г. наибольшее число раз. В этом же году нашим бывшим соотечественникам А. Гейму и К. Новоселову (ныне работающим в Манчестерском университете, Великобритания) “за новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена” присуждена Нобелевская премия по физике. Уже вторая Нобелевская премия (первая – по химии в 1996 г. “за открытие фуллеренов”) говорит об особой роли углеродных наноструктур для НТ. По мнению одного из основоположников науки о фуллеренах японского ученого Э. Осава, если бы не было открытия фуллеренов и, затем, углеродных нанотрубок (УНТ), то появление нанотехнологии могло быть отсрочено, по крайней мере, на несколько десятилетий [Ozawa, Ozawa, 2006]. Воздействие этих открытий оказалось столь большим, что сообщаемые о них статьи остаются самыми высокоцитируемыми среди всех нанопубликаций. Стартовав 25 лет назад, гонка в области углеродных наноструктур держит в напряженном поиске мировое исследовательское сообщество. Общественные ожидания подогревают многочисленные возможности применения углеродных наноматериалов в нанoeлектронике, нанобиотехнологии и наноэнергетике. Именно через эти три укрупненных сектора, по оценке экспертов [Gasman, 2006], будет реализовано не менее 80% экономического воздействия НТ.

“Углеродная” нанотехнологическая гонка

Начало гонке положило открытие фуллеренов (новой аллотропной формы углерода наряду с алмазом и графитом) в физическом эксперименте в 1985 г. учеными из США и Великобритании³. Захватывающая история и обстоятельства этого открытия описаны в нобелевских лекциях лауреатов: Р. Смоли, Р. Кёрла и Г. Крото. После того как в 1990 г. был найден простой способ получения фуллеренов, их изучение превратилось в новое быстроразвивающееся научное направление, а количество посвященных им публикаций (статей, обзоров, трудов конференций, писем) уже через три года превысило тысячу в год (см. рис. 3). Такой интерес обусловлен необычными свойствами фуллеренов, открывающими широкие возможности их применения: в разных условиях они могут становиться органическими ферромагнетиками, сверхпроводниками, электродными материалами, проявлять нелинейные оптические, биологические и другие полезные свойства. Разразившийся мировой “фуллереновый бум”, в частности, предопределил открытие углеродных нанотрубок: сначала многослойных (1991 г.), затем однослойных (1993 г.). По сочетанию феноменальных свойств⁴ и потенциалу применений УНТ превосходят фуллерены, поэтому сразу же привлекли широкий исследовательский интерес. Мировой поток публикаций по УНТ стал экспоненциально нарастать после того, как в 1992 г. их научились получать в граммовых количествах. В 2002 г. он превысил мировой поток публикаций по фуллеренам. Следующей “точкой роста” в изучении новых форм углерода стало экспериментальное открытие в 2004 г. графена – первого двумерного материала толщиной в один атом углерода, возможной будущей основы нанoeлектроники (см. рис. 3). Взрывной интерес к этому наноматериалу, даже на фоне двух его знаменитых предшественников, подчеркивает рисунок 4.

Участие в изучении углеродных наноструктур приняли более 90 стран. В десятку лидеров по количеству публикаций входят или входили в разные годы такие индустриально развитые страны, как США, Япония, Германия, Великобритания, Франция, Италия, Испания, а также азиатские “тигры” – Южная Корея, Тайвань, Сингапур. Впечатляющие результаты у развивающихся гигантов – Китая и Индии.

Китай находится в лидирующей тройке по всем трем типам углеродных наноструктур, а по числу публикаций в области УНТ с 2007 г. – на первом месте. Ученые из Южной Кореи опубликовали свои первые работы по УНТ лишь в 1997 г. Однако в 2001 г. они уже обошли Германию и вышли на четвертое место в мире. Значительный прогресс за тот же период проделал Тайвань, достигший в 2008 г. седьмого места, а Индия переместилась из второй в первую десятку стран. Примечателен стремительный скачок Ирана с 18-го места в 2007 г. на девятое место в 2009 г. Быстро сумел включиться в исследования по графену Сингапур. По публикационной активности в области фуллеренов и УНТ Япония практически не покидала лидирующую тройку, а в области графена она на четвертом месте.

США с небольшими перерывами (уступая первенство по фуллеренам Японии, а по УНТ – Китаю) остается лидером этой углеродной гонки. Они практически первыми перенесли акцент с изучения фуллеренов на УНТ: в 2000 г. количество публикаций американских ученых по УНТ впервые превысило количество публикаций по фуллеренам, а в 2003 г. разрыв был уже в разы. За ними сразу устремился Китай. Эти две страны наиболее активны и в изучении графена. Несмотря на мощный “азиатский вал” публикаций в области углеродных наноструктур, средние показатели их воздейс-

³ Открытая молекула фуллерена C_{60} представляла собой полый полиэдр, составленный из пяти- и шестиугольных граней, встречающихся по три в каждой вершине, где и расположены 60 атомов углерода. Впоследствии название *фуллерены* закрепилось за всем многочисленным семейством замкнутых многогранных молекул чистого углерода.

⁴ 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.

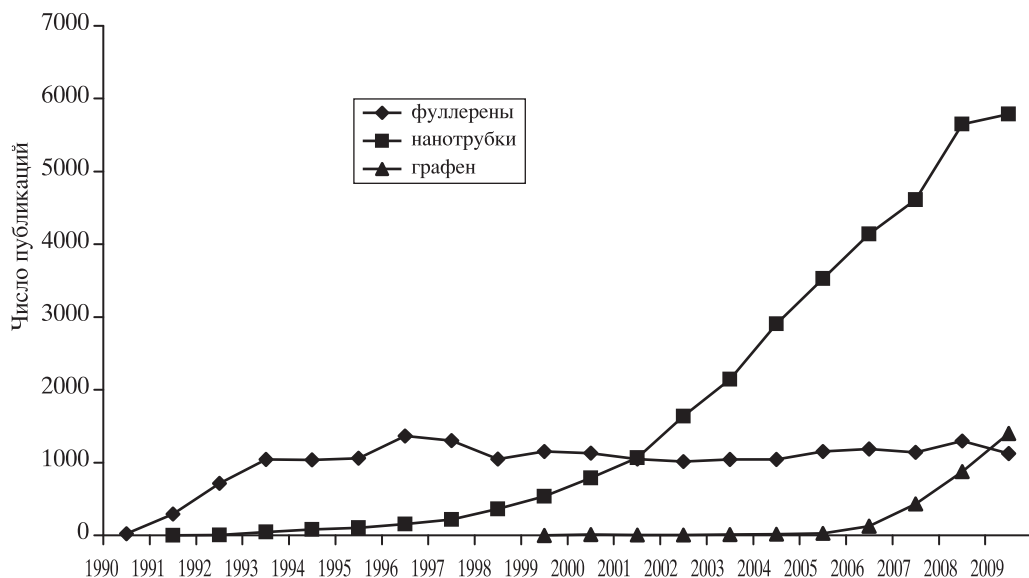


Рис. 3. Количество публикаций в области углеродных наноструктур по годам.

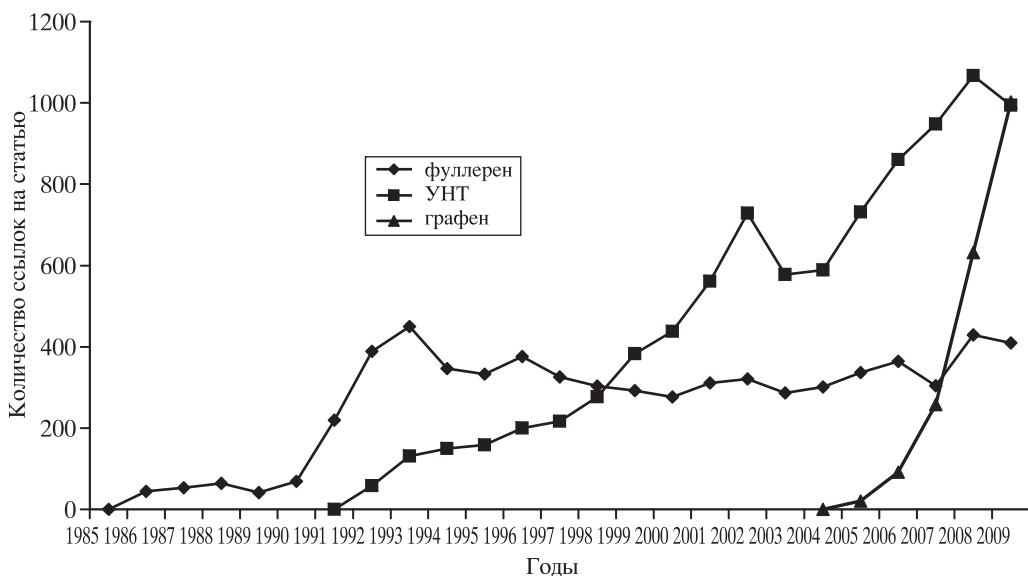


Рис. 4. Цитируемость публикаций, сообщающих об открытии фуллерена, УНТ, графена.

твия по БД SCI-Expanded не столь впечатляющи, за исключением публикаций японских ученых по УНТ (см. табл.). “Элитный пул” составляют статьи ученых из США и ряда европейских стран.

Нельзя не отметить, что интерес к исследованию новых форм углерода, увенчавшийся расчетным обоснованием стабильности молекулы C_{60} в форме усеченного икосаэдра, зародился в нашей стране, в Институте элементоорганических соединений (ИНЭОС) АН СССР в начале 1970-х гг. (см. [Бочвар, Гальперн, 1973]). Однако в дальнейшем этот феноменальный результат не был развит и поддержан. Углеродные нанотрубки впервые наблюдались в электронном микроскопе советскими учеными из Института физической химии АН СССР в 1952 г. При термическом разложении окиси

углерода на железном катализаторе были получены волокна (~100 нм в диаметре) с пустотелыми каналами и заполненными металлом окончаниями. Эти исследования также не были продолжены. Кроме того, статья с этим наблюдением вышла в советском журнале на русском языке [Радушкевич, Лукьянович, 1952] и была недоступна западным ученым.

Теперь уже многие, в том числе и зарубежные исследователи, ссылаются на эту работу. В конце 1991 г., когда японский ученый из NEC Laboratories С. Ииджима доложил о первом наблюдении многослойных нанотрубок [Iijima, 1991], в Институте биохимической физики РАН возникла идея о возможности иных, чем известный уже тогда фуллерен, полых углеродных структурах. Так, если мысленно разрезать фуллерен пополам и между половинками вставить свернутый в цилиндр кусок графитового листа, то должен получиться баррелен – вытянутая бочкообразная молекула. Расчет такой молекулы, проведенный в ИНЭОС РАН, показал ее высокую устойчивость и указал на хорошие проводящие свойства “бесконечного” по длине ее аналога – нанотрубки. Осенью 1991 г. эти идеи обсуждались на теоретическом семинаре академика В. Гинзбурга в Физическом институте РАН. На их основе в конце 1991 г. в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН был успешно осуществлен оригинальный метод приготовления пленок, содержащих УНТ, при выбивании электронным пучком углеродного факела из графита. Присутствие нанотрубок было подтверждено и в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова (МГУ) с помощью сканирующей туннельной микроскопии. Статья об этом вышла в начале 1992 г. [Косаковская, Чернозатонский, Федоров, 1992] одновременно с работой американских ученых об электродуговом методе получения УНТ в макроколичествах. В 1994 г. группа исследователей из ИРЭ РАН во главе с академиком Ю. Гуляевым впервые доложила на Международной конференции по вакуумной электронике о высокоэффективной полевой эмиссии электронов с нанотрубок. Сейчас это уже признанный факт, и эмиссия с УНТ стала широко применяться в различных приборах. Решающий вклад в открытие графена, как было отмечено, в 2004 г. сделали российские ученые, как бывшие, так и представляющие ИИТМ РАН. К сказанному можно добавить, что отечественными учеными были разработаны метод получения детонационных наноалмазов и технология получения нанопористого углерода [Вуль].

Приведенные выше примеры подчеркивают: в поиске и изучении новых форм углерода советская и российская научные школы традиционно удерживали высокую планку и нередко достигали опережающих результатов. Однако не всегда они были замечены и вовремя поддержаны научными властями страны. Фуллерены – тот случай, когда хоть и запоздалая поддержка дала эффект. Проводимые в России разрозненные исследования в 1992 г. по инициативе Санкт-Петербургских ученых были объединены в поисковую научную программу, которая затем при поддержке Минпромнауки была оформлена в направление Государственной научно-технической программы “Актуальные направления в физике конденсированных сред”. Этот шаг сыграл важную роль в создании российского сообщества исследователей, занимающихся данной проблемой и на равных сотрудничающих с зарубежными коллегами. В рамках программного направления финансовую поддержку получили научные коллективы (63 в 1997 г.) из Москвы и Московской области, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Казани, Нижнего Новгорода, Уфы, Красноярска, многие из них стали широко известны и признаны в мире.

Начиная с 1993 г. раз в два года в Санкт-Петербурге проводится конференция “Фуллерены и атомные кластеры” – крупнейший международный форум, на котором побывали практически все мировые звезды в науке о фуллеренах. Значительную роль в институционализации и поддержке развития направления сыграла деятельность учрежденного в 1993 г. Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). Достаточно отметить, что в частотном терминологическом словаре проектов РФФИ 1993–2006 гг. термин “фуллерен” занимал вторую строчку после термина “наноструктура”. По количеству публикуемых работ в области изучения фуллеренов и их произ-

водных Россия с 1996 г. занимала третье место в мире, которое уступила Китаю лишь в 2005 г.

Соавторские связи со всеми главными участниками мировой научной гонки (наиболее тесные с Германией, США, Францией, Великобританией, Японией) свидетельствуют о мировом уровне проводимых в нашей стране исследований. Можно отметить значительный вклад институтов РАН и МГУ в исследовательскую базу рассматриваемого направления, вовлеченность в исследование основных российских научных центров. За всю историю развития науки о фуллеренах публикационный вклад РАН самый большой среди научных организаций разных стран мира. Хотя средний показатель цитируемости российских публикаций сравнительно низок (см. табл.), семь из них были процитированы свыше 100 раз, то есть оказали значимое воздействие на развитие направления. Приоритет российских ученых в области синтеза и применения сверхтвердого материала на основе фуллерена C_{60} закреплен американским патентом. В НИИ Лазерной физики (Санкт-Петербург) изобретен фуллерен-кислород-йодный лазер, который может быть использован в лазерной энергетике и медицине. Значительные научные заделы имеются в области исследования нелинейно-оптических свойств фуллеренов, создания на их основе противовирусных вакцин, и др.

Тем не менее, имея сразу вслед за японцами первые работы по УНТ, мы в дальнейшем упустили сдвиг мирового исследовательского тренда в пользу этого направления исследований и к 2009 г. оказались по количеству публикаций лишь на 14-м месте. Показательно, что в Китае изучать УНТ начали позже, чем у нас, однако целенаправленная поддержка государства позволила резко нарастить исследовательские усилия и по количеству ежегодных публикаций выйти на первое место в мире.

Вообще, УНТ – “любимое дитя” государственной поддержки нанотехнологии: именно с принятием рядом стран в начале 2000-х гг. нанотехнологических инициатив стал резко нарастать мировой поток посвященных им публикаций (см. рис. 3). Это сопровождалось экспоненциальным ростом патентных заявок на УНТ, число которых достигло в 2007 г. 1450. Прогнозируется, что в ближайшие пять лет объем рынка УНТ будет расти со среднегодовым темпом 58,9%.

Россия не смогла вовремя встроиться в мировой тренд, поэтому ее перспективы в области изучения и применения УНТ остаются под вопросом. Сравнение, охватывающее 1993–2006 гг., показало: если по количеству грантов РФФИ нанотрубки уступали фуллеренам в 2,2 раза, то по количеству публикаций – в 3 раза, а по количеству российских патентов на изобретения (за вычетом патентов, выданных иностранным заявителям) – уже в 3,5 раза. То есть разрыв от финансирования фундаментальных исследований до патентования изобретений нарастает кумулятивно.

Эта ситуация распространилась и на коммерциализацию фуллеренов и УНТ. Если в первом случае у нас есть как возможности промышленного получения, так и конкурентоспособные технологии применения (сверхтвердый фуллерит и изделия из него, приложения в биомедицине, лазерной технике и др.), то во втором мы уступаем не только ведущим игрокам из Азии, Америки и Европы, но и таким странам, как Бельгия и Кипр. Отсутствие собственного производства качественных однослойных УНТ тормозит уже продвижение самих исследований.

К сожалению, с графеном ситуация повторяется. Хотя самая высокоцитируемая на настоящий момент статья по графену имеет российское соавторство, а по среднему показателю цитируемости Россия вторая после Великобритании, по количеству публикаций в этой области в 2009 г. мы лишь на 11-м месте. Последнее означает, что у нас нет достаточно широкой научной школы для успешного развития этого направления. Лидируют по количеству публикаций США (с большим отрывом) и Китай.

Таким образом, хотя ряд российских работ в области углеродных наноструктур, выполненных в ИНЭОС РАН, ФТИ РАН, ИПТМ РАН, МГУ и др., имеют высокие показатели воздействия, поддерживать широкий фронт и темп исследований на уровне лидеров мы не в состоянии. По цепочке это сужает базу для патентоспособных изобретений, уменьшает возможность появления оригинальных отечественных разработок и

патентно-чистых промышленных технологий. Не случайно генеральный директор Государственной корпорации “Роснано” А. Чубайс, выступая на 3-м Нанофоруме в Москве, признал, что в области углеродных наноструктур (фуллерены, УНТ, графен) особых результатов у нас нет. Однако его призыв к созданию прорывной промышленной технологии нельзя реализовать без опоры на фундаментальную науку, а здесь надежды наши серьезно подорваны.

Несмотря на стремительный рост в 2007 г. инвестиций в сферу нанотехнологий, вклад России в мировой научный выход здесь продолжает снижаться: по количеству нанопубликаций в БД SCI-Expanded на октябрь 2010 г. Россия уже 12-я. А это означает, что в причинах отставания финансовый фактор перестал быть основным. “Фуллереновый бум” пришелся на период выживания отечественной науки. Тем не менее относительного успеха удалось добиться, благодаря государственной поддержке и еще сохранявшемуся кадровому потенциалу.

В развитии фуллереновой тематики в 1991–2003 гг. приняли участие примерно 1800 российских ученых, из которых активными и мотивированными на конец периода (опубликовавшими в 2002–2003 гг. более одной статьи в данной области) остались около 370 человек. Средний возраст 50 самых продуктивных из них в 2003 г. был равен 52 годам, а первых десяти – превысил 56 лет. Впоследствии двое наиболее молодых из первой десятки эмигрировали в США, включая представителя МГУ О. Болталину, входящую в TOP-15 мирового публикационного рейтинга ученых в области фуллеренов (индекс Хирша равен 23). Вообще же в образовавшуюся российскую “фуллереновую диаспору” вошли десятки ученых мирового класса, проживающие 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 высококлассных ученых означает утерю накопленного неотделимого знания, необходимого для передачи его молодежи, приводит к разрыву преемственности поколений, отставанию в подготовке национальных кадров исследователей. Так, по количеству диссертаций, посвященных изучению фуллеренов, мы уступали США в 1997–1998 гг. на порядок. Вероятно, кадровое истощение сыграло не последнюю роль в том, что по количеству публикаций мы уступили в 2005 г. третье место Китаю. Кроме того, поскольку значительная часть специалистов по УНТ начинали с изучения фуллеренов, это не могло не сказаться на ослаблении позиций России и в данной области.

Высокая цитируемость публикаций по графену не дает прочного преимущества без опоры на широкую научную школу, поскольку оно может прерваться с эмиграцией одного-двух продуктивных ученых. Показательно, что никто из эмигрировавших российских “звезд” в области углеродных наноструктур (включая А. Гейма и К. Новоселова, покинувших страну в 1990 и 1999 гг., соответственно) не подал заявки на мегагрант российского правительства в 2010 г. Проблема кадров представляет интерес для более глубокого рассмотрения.

О кадровом ресурсе развития нанотехнологии

РФФИ – один из крупнейших в мире научных фондов по числу финансируемых проектов и их участников. Данные его электронного банка, в том числе о проектных коллективах и отдельных ученых, достаточно представительны для статистического анализа. Участниками проектов являются как опытные исследователи, так и еще учащаяся молодежь (студенты, аспиранты), что позволяет более динамично представить кадровую картину. Мною были отобраны 1353 исследовательских нанопрокта, стартовавших в 2006–2008 гг., участниками которых были около 8,7 тыс. человек⁵. На рисунке 5 приведена кривая их возрастного распределения, а также аналогичная кри-

⁵ С небольшой степенью натяжки о них можно говорить как обо всех участниках проектных исследований РФФИ по нанотематике в 2008 г.

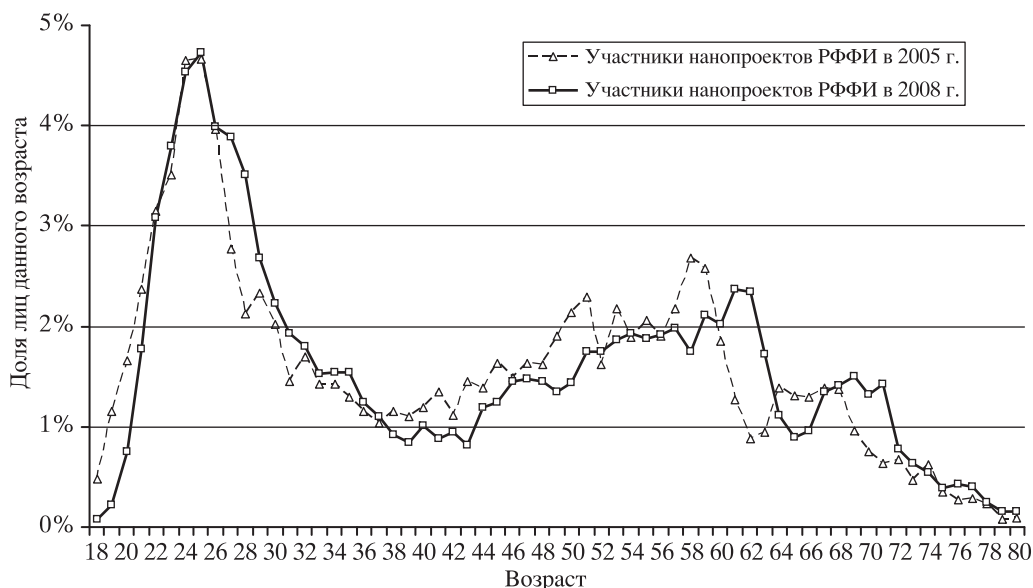


Рис. 5. Возрастное распределение участников нанопроектов РФФИ.

вая, относящаяся к 2005 г. Форма кривых включает молодежный “пик” с последующим “провалом” на месте 30–40-летних возрастов, небольшое возвышение на месте пятидесятилетних и длинный послепенсионный “хвост”⁶.

Причины образовавшегося “провала”, надолго нарушившего естественный цикл воспроизводства научных кадров, известны. В этой ситуации перед молодыми исследователями, казалось бы, открывался хороший шанс для занятия свободных позиций в науке. Однако многолетний мониторинг данных РФФИ показал, что наблюдаемый молодежный “пик” представляет собой некоторое “проточное” образование, обновляющееся по составу, но не дающее существенного пополнения в следующие возрастные категории [Алфимов, Минин, Либкинд, 2003]. В условиях невостребованности и финансовых тисков, в которых оказалась отечественная наука, достойных вариантов для продолжения научной карьеры в стране было мало. Кроме того, “проточная” молодежь обучалась в школе и вузах в тот период, когда романтика научного поиска утратила привлекательность и на первый план вышли материальные критерии успеха. Сейчас же, когда власти наконец обратили внимание на науку и для молодых исследователей открылись перспективы приложения в ней своих сил (исследовательские университеты, национальная нанотехнологическая программа, проект “Сколково” и др.), на ситуацию станет влиять демографический фактор, срезающий молодежный “пик”.

С 2012 г. из вузов начинает выпускаться поколение 1990-х гг. Из-за демографической ямы, глубина которой измеряется двукратным падением рождаемости с 1987 по 1997 г., молодежный резерв науки в течение 10–15 лет будут пополнять ослабленные количественно и качественно возрастные когорты, что сократит базу подпитки для ученых средних возрастов. Таким образом, разрыв поколений, нарушающий нормальный процесс накопления научного знания и его межпоколенной передачи, еще долго не удастся преодолеть. Скорее всего, профессиональное ядро исследователей в продуктивных возрастах станет и дальше количественно сжиматься.

Конечно, нужно пытаться вернуть из-за границы 30–40-летних ученых, сохранивших российское гражданство, создавая для них достойные условия работы на родине

⁶ Подобная форма возрастного распределения характерна не только для участников нанопроектов, но и для всех участников проектов РФФИ.

[Вуль], однако вряд ли это приведет к их массовому притоку. Кроме того, есть и обратная сторона: на денежную приманку откликнутся не самые лучшие; будет усилена ведущаяся “охота” за молодыми научными талантами и т.д.

В стратегической борьбе за нанотехнологические рынки для нашей страны наиболее важна и приемлема линия опережающего развития, базирующаяся на генерации нового знания, создании подлинно инновационных разработок [Третьяков, Гудилин, 2009]. Реализация такой линии невозможна без специально подготовленных национальных кадров исследователей. О существующих сложностях говорят следующие цифры. В 2008 г. средний возраст научных работников РАН, дающий более половины всех нанопубликаций, и ста наиболее продуктивных в 2006–2008 гг. в области НТ российских ученых (согласно БД SCI-Expanded) был равен 51 году, десяти же самых высокопродуктивных – 56,6 лет. Если в 1997 г. двенадцать ученых из России (в основном представителей научной школы академика Ж. Алферова) входили в сотню самых продуктивных авторов, то в 2009 г. их не было даже в числе первых 500.

Вернемся к данным РФФИ. Среди участников нанопроектов 2008 г. выделим три группы: тех, кто участвовали в нанопроектах и в 2005 г.; “новых” участников, то есть тех, кто не участвовали в нанопроектах 2005 г., хотя могли участвовать в других проектах РФФИ, и “новых” участников без ученой степени. Численность выделенных групп составляет, соответственно, 2,3, 6,4 и 3,1 тыс. человек. Замечу, что значительный приток и обновление состава, тем не менее, не привели к его совокупному омоложению, а наоборот, средний возраст вырос с 2005 по 2008 г. на один год.

Сопоставление графиков на рисунке 6 показывает, что улучшение возрастной структуры исследовательских кадров возможно лишь постепенно за счет молодежной составляющей притока. Однако здесь нас ожидают не только демографические проблемы. Значительная часть “новых” участников без ученой степени – это студенты и аспиранты (48%), научные и младшие научные сотрудники (21%). Однако среди них пока еще нет дипломированных специалистов, поскольку только в 2004 г. в ряде ведущих вузов страны началась подготовка студентов по специальностям “нанотехнология в электронике” и “наноматериалы”. Это способствует большей “проточности”. Так, в новом нанопроекте 2008 г. продолжили участие около 40% 20-летних участников нанопроектов 2005 г., тогда как для той же возрастной группы участников всех проектов РФФИ аналогичный коэффициент перехода составил 52%.

Качественная подготовка в вузе специалиста в области НТ требует междисциплинарного образования по обновленным программам, сочетания обучения с проведением исследований на современном научном оборудовании. Однако опыт организации междисциплинарного образования есть лишь у нескольких университетов страны, а новые специализированные научно-образовательные центры пока не очень приспособлены для проведения современных фундаментальных исследований [Третьяков, Гудилин, 2009]. Но даже если требуемые условия удастся быстро создать, наращивание выпуска специалистов придется на поколение из демографической ямы.

51,1% контингента “новых” участников – квалифицированные исследователи, среди которых 73,2% – кандидаты и 26,8% – доктора наук. Преобладают кандидаты и доктора физико-математических наук (47,8%), за ними следуют химические (27,1%) и технические (19,0%) науки. По меньшей мере, половина из состава докторов наук (тех, кто получили ученую степень до 1992 г.) едва ли смогут еще длительное время плодотворно трудиться в нанообласти, имея в 2008 г. средний возраст 68,6 лет. Другая половина (ставших докторами наук, начиная с 1992 г.) по средневозрастному показателю (55,6 лет в 2008 г.) еще способна, хотя и не с наивысшей продуктивностью, продолжить исследовательскую деятельность в нанообласти. Примерно половина из состава кандидатов наук (тех, кто получили ученую степень до 1999 г.), имея средний возраст 56,9 лет, едва ли представляют перспективный контингент для нанообласти.

Средний возраст другой половины (ставших кандидатами наук, начиная с 1999 г.) – 37,3 лет – вполне оставляет возможность для квалификационного роста и продуктив-



Рис. 6. Возрастное распределение трех категорий участников нанопроектов РФФИ в 2002 году.

ной работы в избранной области. Даже эти простые сопоставления показывают, что перспективы исследований в сфере НТ можно связывать только с двумя массовыми контингентами: вновь привлеченной молодежью без ученых степеней и защитившимися относительно недавно кандидатами наук. Однако для их закрепления и квалификационного роста в избранной области необходим мотивационный механизм, в том числе через подготовку и защиту диссертаций.

Для соответствующих оценок в БД ВАК России отобраны 172 кандидатские и 94 докторские диссертации, которые защищены по нанотематике в период 1999–2003 гг. Как показал перекрестный поиск в БД РФФИ, 77 из 172 (44,8%) отобранных кандидатов наук и 51 из 94 (54,3%) докторов участвовали в нанопроектах РФФИ с 2003 по 2008 г. В то же время среди участников нанопроектов 2006–2008 гг. с ученой степенью кандидата наук, полученной в период 1999–2003 гг., 11,3% защитили диссертацию по нанотематике. Для докторов наук аналогичный показатель составляет 31,3%. Таким образом, профильный квалификационный рост создает мотивацию для исследовательской деятельности, однако для нанообласти сейчас характерен массовый приток квалифицированных ученых (особенно кандидатов наук), не имеющих профильной подготовки. Специальность “нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям)” введена в номенклатуру специальностей для присуждения ученых степеней ВАК России только в 2009 г. Для того чтобы дать результаты, стартовавшая целенаправленная подготовка потребует определенного времени, организационных усилий и финансовых затрат. Следует также учитывать растянутость процесса квалификационного роста ученого в нашей научно-аттестационной системе, хотя средний возраст защиты кандидатской диссертации по нанотематике (29,9 лет) заметно снизился.

Нельзя сбрасывать со счетов международный фактор. Создание гибкой инфраструктуры, включая такой важнейший ее компонент, как квалифицированная рабочая сила, явилось одной из главных целей Национальной нанотехнологической инициативы США, десятилетние итоги которой подводит доклад [Report... 2010]. Еще в 2002 г. Национальный научный фонд США объявил образовательную программу по нанотехнологии для студентов, а в 2003 г. – для учащихся средней школы. В результате в 2005 г. при поддержке фонда прошли обучение около 10 тыс. студентов и преподавателей. В США по-прежнему обучаются больше всего в мире студентов, желающих получить степень Ph.D. в области НТ. Обладание лучшими в мире талантами, по мне-

нию авторов доклада, имело решающее значение для успехов США в этой области. Поэтому на будущее доклад рекомендует принять правительственные меры по удерживанию в стране талантливых иностранцев, получивших ученые степени в США. Другие основные игроки также понимают важность борьбы за креативные кадры, и конкуренция за мировое лидерство во многом будет конкуренцией образовательных систем и лучших условий для творческой научной деятельности. Отстав с принятием нанотехнологической программы от ведущих стран на пять–семь лет, мы, вероятно, понесем в этой борьбе дополнительные потери.

Таким образом, переход к инновационной экономике, “локомотивом” которого должна стать нанотехнология, в России совпал с масштабным кризисом исследовательских кадров. Напомню образно сформулированный и действующий повсеместно “закон” истощения продуктивных научных кадров: «Из молодых студентов, отобранных для подготовки в ученые, многие никогда не достигнут степени выше бакалавра; из тех, кто ее достигнут, многие никогда не произведут что-либо, кроме своей диссертации; для многих из тех, кто произведут, это будут лишь немногочисленные дополнительные результаты, после чего они “умрут” как ученые; из тех, кто не умрут научно, многие преждевременно умрут физиологически, переключатся на другую область или эмигрируют; а из оставшихся все, в конце концов, умрут или перестанут быть продуктивными в науке» [Moravcsic, Gibson, 1979, p. 28].

Сохранение лишь размера и качества продуктивного научного сообщества – сложная задача, требующая постоянного его пополнения и непрерывного внимания к его здоровью. Мы же надолго пренебрегли этим обстоятельством. Можно ли за короткий срок преодолеть кадровый кризис в науке? Логика и исторический опыт отвечают, что нет. По оценкам американского историка науки Д. Прайса, США и Японии для создания научных кадров достаточного размера и качества потребовалось до полувека, хотя материальные условия весьма благоприятствовали этому. Вспомним Германию, которая, потеряв ведущие научные школы, не сумела воссоздать развитую науку, имевшуюся у нее до войны. Тем более непонятно упрощенное представление о разрешении кадровой проблемы в наших программных документах по развитию НТ.

Так, согласно “Программе развития nanoиндустрии в РФ до 2015 года” (уточненный проект) доля лиц до 39 лет среди исследователей в области nanoиндустрии должна достигнуть к 2015 г. 50% (фактическая доля в 2008 г. – 31%). Замечу, что при значительной студенческой составляющей медианный возраст для распределений на рисунке 5 составляет 43,5 лет. Программируемое число исследователей должно вырасти с 10,3 в 2008 г. до 12,4 тыс. человек в 2015 г. Согласно несложному расчету, чтобы достичь целевых 50%, в первую группу (меньше или равной 39 годам) нужно ежегодно принимать: 300 человек в счет расширения всего контингента и примерно столько же за счет увольнения людей из второй группы (больше 39 лет).

Конечно, на эту схему нужно было бы наложить показатели естественной убыли и мобильности ученых. Однако в любом случае подобный режим воспроизводства кадров практически невозможен. Но даже если бы гипотетически его удалось реализовать, то “сконструированное” за семилетний период сообщество исследователей оказалось бы малопродуктивным. Глубина и комплексность стоящих проблем делает кадровый барьер основным для успешного долговременного развития НТ в нашей стране. Как бы того ни хотелось, его не удастся преодолеть наскоком.

* * *

Мировой нанотехнологический проект часто сравнивают с атомным или космическим проектами, однако по масштабу и глубине воздействия на экономику и общество он их значительно превосходит. НТ рассматриваются как стержень для построения в XXI в. экономики и общества знаний. Сегодня практически каждая страна, поддерживающая исследования и разработки, имеет свою нанотехнологическую инициативу [Report... 2010]. Вряд ли найдется другая технологическая область, которая по размеру и скорости привлечения государственных инвестиций в мире сравнится с НТ.

Для США уровень правительственных ассигнований стал невиданным со времен Манхэттенского проекта и Американской лунной программы. Согласно данным Lux Research⁷, в 2004 г. правительство США потратило на нанотехнологии примерно в два раза больше средств, чем на проект Генома человека в его пиковый год, а в 2005 г. НИИ по суммарным ассигнованиям обошла этот проект. Растут инвестиции и частного сектора: в 2007 г. (впервые) и 2008 г. по совокупному финансированию вклад в НТ корпорации превзошел правительственный.

Россия намеревается инвестировать в НТ до 2015 г. около 10,6 млрд долларов. По темпу инвестиций на сопоставимом стартовом отрезке нас превзошли лишь США и, возможно, еще одна-две страны: по данным Lux Research, с 2000 по 2007 г. весь мир инвестировал в НТ примерно 53 млрд долларов, причем доля США составляла около 44% этой суммы [Report... 2010].

Питают ли это амбиции России на вхождение в группу лидеров? Для поиска ответа на этот вопрос в статье использован наукометрический анализ, дающий основу для объективных суждений и межстрановых сопоставлений. Поскольку НТ ведома наукой, прежде всего интересны библиометрические индикаторы формирования ее научной базы. Характерно, что в первой половине рассмотренного двадцатилетнего периода НТ развивалась в конкурентной среде с другими научными областями, тогда как во второй стала приоритетом для значительной группы стран. Несмотря на социально-экономический кризис 1990-х гг., отечественная наука до определенного момента смогла даже увеличивать свой вклад в мировую науку в области НТ, а целевая государственная поддержка позволила ей до сих пор сохранять конкурентоспособность в таком направлении, как “фуллерены”.

К сожалению, России не оказалось среди стран, первыми осознавших потенциал НТ и организовавших ее приоритетное финансирование на государственном уровне. Пяти-семилетнее запоздание ослабило, как показывают библиометрические рейтинги, конкурентные позиции нашей страны, причем к перелому не привел даже масштабный рост инвестиций в НТ, начавшийся с 2007 г. Ситуацию стал определять кадровый фактор.

Негативные моменты в условиях и параметрах воспроизводства отечественных научных кадров накапливались давно, однако разрушительный удар по ним был нанесен в 1990-е гг. В то же время уходит корнями и следующее потрясение, ожидающее российскую науку. Внутреннюю и внешнюю утечку умов, породившую разрыв связей научных поколений, вскоре дополнит ограничение их возможного притока в силу демографических причин. Такое сочетание реально угрожает всей системе генерации научного знания, способного подпитывать непрерывный поток инноваций.

Для эффективной научной политики необходимо во многом опережающее кадровое сопровождение. Успех в создании советской ядерной бомбы, как подчеркнул академик Алферов, предопределил приоритет фундаментальных исследований и подготовки кадров. Пожалуй, ни в чем так наглядно не проявились провалы российской научной политики за последние двадцать лет, как в кадровой проблеме. Девиз 1990-х гг. “в России слишком много науки”, помимо прочих негативных моментов, послужил мощным дезориентиром для учащейся молодежи. Уже в те годы можно было предвидеть ожидающий российскую науку демографический “шок” после 2012 г. [Терехов, 1994] и попытаться принять упреждающие меры. Однако победили представления, что интеллектуальный “резервуар” у нас неисчерпаем и в нужный момент его можно будет задействовать.

Важнейшим научным событием на рубеже XX–XXI вв. стала мировая “углеродная” гонка, которая, начавшись с неориентированного фундаментального открытия (фуллерена), привела к созданию лучшего материала для нанотехнологии (УНТ и графена). Наше право участвовать в ней определили еще советские научные кадры, которым удалось добиться от российского правительства поддержки исследований по

⁷ Ведущая в области НТ аналитическая компания из США.

фуллеренам. Первоначальные инвестиции государства не преминули дать как научный, так и прикладной результат, но, главное, позволили России продолжить участие в мировом “наноуглеродном проекте” с потенциально огромным коммерческим выходом. К сожалению, в дальнейшем государство не поддержало этот своеобразный “опцион”, и, упустив время для исследований и подготовки кадров, мы значительно понизили свои шансы на успех как в научной гонке, так и в ожидаемых коммерческих выгодах.

Из-за близорукой политики при переходе к рынку был нанесен трудновосполнимый урон национальным кадрам исследователей как раз тогда, когда в развитых рыночных системах конкуренция в сфере НИОКР стала основным видом неценовой конкуренции. Настораживает отсутствие понимания глубины стоящих проблем, путей их разрешения. Чего стоят, например, заявление научных властей о возможности решить кадровую проблему к концу 2013 г. или ошибочные целевые показатели, заложенные в “Программу развития наноиндустрии в РФ до 2015 года”.

Рекламный ажиотаж вокруг НТ не создает устойчивых мотиваций для молодежи (высока “проточность” молодых исследователей в нанопроектах РФФИ) и способен под модным “наносоусом” консервировать старые тематики в ущерб поисковым (таким, например, как активные наноструктуры, представляющие следующий этап развития НТ). Не вполне обоснован расчет на российскую диаспору и зарубежных научных “звезд”. К сожалению, выполненный в статье анализ не подкрепляет заявленных амбиций на вхождение России в “высшую лигу” мировых лидеров по нанотехнологии, по крайней мере к 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алфимов М.В., Минин В.А., Либкинд А.Н. Хроника распада. Наше научное сообщество не только стареет, но и теряет квалификацию // Поиск. 2003. № 10 (720).

Бочвар Д.А., Гальперн Е.Г. О гипотетических системах: карбододекаэдре, s – икосаэдре и карбо – s – икосаэдре // ДАН СССР. 1973. Т. 209. № 3.

Вуль А.Я. Наноуглерод: исследование и применение (www.nanorfu.ru/events.aspx?cat_id=227&d_no=450).

Зибарева И.В., Зибарев А.В., Бузник В.М. Российская наноука: библиометрический анализ на основе баз данных STN International // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18. № 2.

Косаковская З.Я., Чернозатонский Л.А., Федоров Е.А. Нановолоконная углеродная структура // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56. № 1.

Радушкевич Л.В., Лукьянович В.М. О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте // Журнал физической химии. 1952. Т. 26. № 1.

Терехов А.И. О проблемах воспроизводства кадрового потенциала российской науки // Проблемы прогнозирования. 1994. № 2.

Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Там, внизу, все еще много нанобума // В мире науки. 2009. № 5.

Фейнман Р.Ф. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики // Российский химический журнал. 2002. Т. XLVI. № 5.

Gasman L.D. Nanotechnology Applications and Markets. Norwood (Mass.), 2006.

Huang C., Notten A., Rasters N. Nanotechnology Publications and Patents: a Review of Social Science Studies and Search Strategies. UNU-MERIT Working Paper Series. 2008-58.

Iijima S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon // Nature. 1991. Vol. 354. Issue 6348.

Moravcsik M.J., Gibson S.G. The Dynamics of Scientific Manpower and Output // Research Policy. 1979. Vol. 8. № 1.

Ozawa M., Osawa E. Carbon Blacks as the Source Materials for Carbon Nanotechnology // Carbon Nanotechnology. Dordrecht, 2006.

Report to the President and Congress on the Third Assessment of National Nanotechnology Initiative. March 12, 2010.

Taniguchi N. On the Basic Concept of “Nano-technology” // Proceedings of the International Conference on Production Engineering. Part II. Tokyo, 1974.