

# Наукометрический подход к нанотехнологии

*В статье представлен краткий библиометрический анализ развития нанотехнологии с оценкой позиций России, в том числе по таким направлениям, как углеродные наноструктуры и нанофотоника. Рассчитан ряд характеристик исследовательских кадров, значимых для оценки перспектив развития нанотехнологии в нашей стране. Исходная статистика получена из БД SCI-Expanded (ISI Web of Knowledge). Дополнительно использованы данные из отечественных БД: Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и Роспатента.*

**Ключевые слова:** нанотехнология, углеродные наноструктуры, нанофотоника, библиометрический анализ, исследовательские кадры.

**JEL classification:** O32, C89.

## 1. Введение

Существует широкое понимание нанотехнологии (НТ)<sup>1</sup> как ключевой технологии XXI века. Практически каждая страна, поддерживающая исследования и разработки, сегодня имеет свою нанотехнологическую инициативу; правительства видят в НТ источник преобразующих инноваций, воздействие которых может возрасти через конвергенцию с био-, инфо-, когно- технологиями. Вряд ли другая научно-технологическая область способна сравниться с нанотехнологией по темпам государственного инвестирования, под стать которому растут инвестиции и частного сектора. В силу ее специфики (наукоемкость, междисциплинарность, быстрая смена исследовательских фронтов) для анализа и выработки политики только экспертных методов не достаточно: требуются объективные измерения. Поскольку НТ появилась недавно, надежные данные об экономических результатах (доходы, доля рынка, товарооборот и др.) для нее пока отсутствуют. Чтобы оценить конкурентные позиции стран, в основном приходится использовать выходные наукометрические индикаторы (количество научных статей, патентов и т. д.), которые дают представление о научно-технологическом заделе страны, способном послужить фундаментом для будущих нанотехнологических инноваций и экономического развития. На Западе такие работы широко освещаются (см. обзор (Huang et al., 2008), специальный выпуск журнала (Scientometrics, 2007)). В нашей стране наукометрические исследования пока единичны (Markusova et al., 2009; Терехов, 2009), и даже в официальных выступлениях часто используются ссылки на зарубежные оценки по России.

В данной статье представлен краткий библиометрический анализ развития нанотехнологии с оценкой позиций России, в том числе по таким направлениям, как углеродные на-

<sup>1</sup> «Зонтичный» термин для технологий, осуществляющих манипуляцию веществом в нанодиапазоне (1–100 нм, 1 нм = 10<sup>-9</sup> м).

ноструктуры и нанофотоника. Рассчитан ряд характеристик исследовательских кадров, значимых для оценки перспектив развития НТ в нашей стране.

## 2. Библиометрические оценки исследований

Благодаря своей массовости, журнальные публикации имеют наибольшую ценность при анализе масштабов, структуры и источников развития исследований. Для настоящей работы исходная выборка получена путем поиска в БД SCI-Expanded по ключевым словам, содержащимся в названиях публикаций<sup>2</sup>. За период 1990–2009 гг. в указанной БД выделено 303484 публикации по нанотехнологии (будем называть такие публикации нанопубликациями), авторами и соавторами которых являются представители более 120 стран. На рисунке 1 представлена лидирующая десятка стран по вкладу в массив нанопубликаций. Рисунок 2 показывает, что несмотря на повышение внутреннего интереса отечественных ученых к проблемам НТ (растущий график), публикационный вклад России в мировой научный выход за рассматриваемый период существенно менялся. Достигнув максимума 8.1% в 1997 г., он стал неуклонно снижаться вплоть до 3.5% в 2009 г., что переместило страну с 5-го на 10-ое место в мире. Негативные тенденции стали очевидным следствием недостаточного внимания к науке в нашей стране и целевой поддержке приоритетных областей на фоне принятия многими странами в начале 2000-х гг. национальных программ развития НТ. Ситуацию не смог переломить

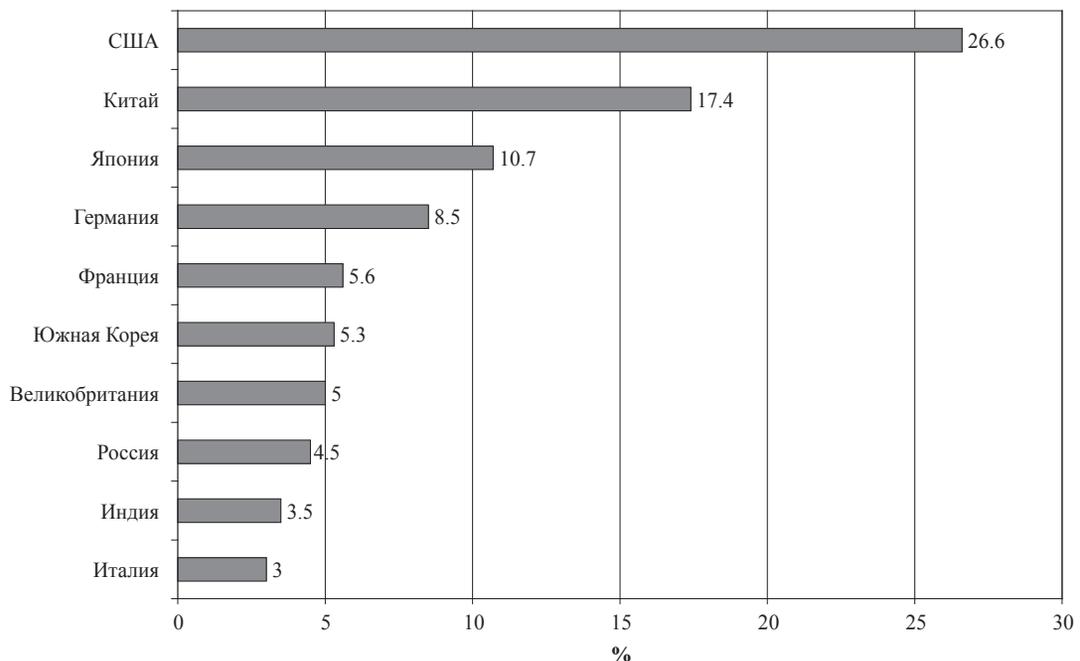


Рис. 1. Долевой вклад страны в массив нанопубликаций за период 1990–2009 гг.

<sup>2</sup> Помимо терминов с приставкой nano, в состав поисковых введены термины: *fullerene*, *quantum dot*, *photonic crystal* и др. Напротив, исключены термины: *nanogram*, *nanosecond* и т. п., представляющие «шум». Представляется, что принятая стратегия поиска достаточно корректна в плане отсева нерелевантных и мало релевантных работ.

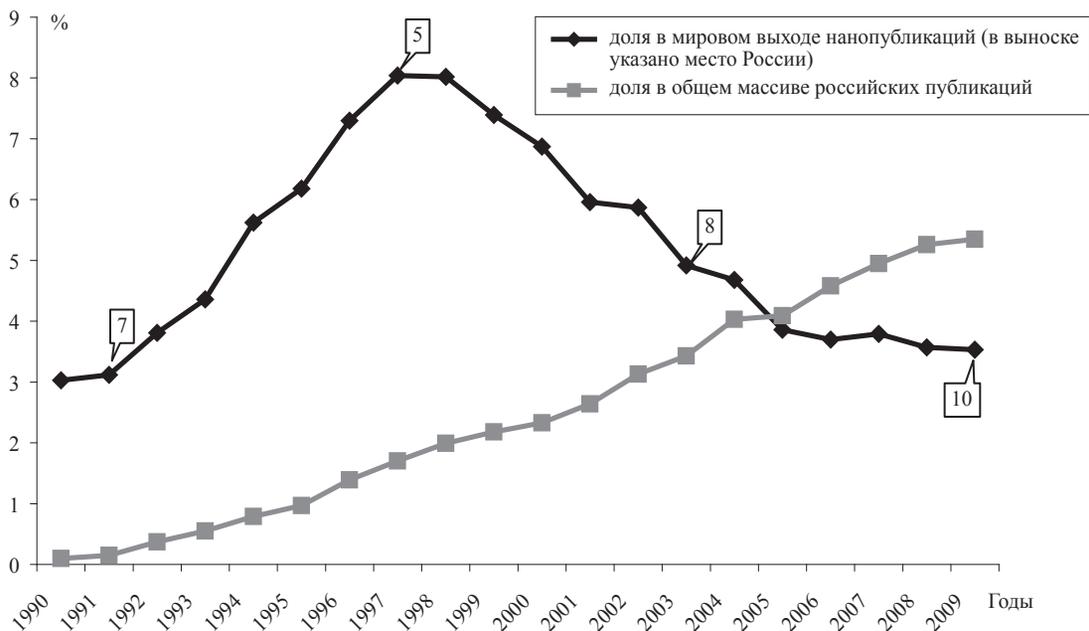


Рис. 2. Изменение доли российских нанопубликаций в мировом выходе и в общем массиве российских публикаций (БД SCI-Expanded)

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 году 14-ое и 15-ое места.

При формировании и оценке научной политики часто важны показатели цитируемости. В рассчитанной на октябрь 2010 г. таблице 1 страны расположены по убыванию кумулятивного показателя цитирования всех нанопубликаций с участием данной страны в БД SCI-Expanded за 1990–2008 годы. По этому показателю Россия находится на 13-ом месте, на которое она опустилась с 10-го места в предыдущем году. Среднее число ссылок на одну нанопубликацию (9.9) оставляет нас в четвертом десятке стран. Лидер по библиометрическим индикаторам — США, которые имеют самый большой вклад (26.6%) в массив нанопубликаций и, хотя по среднему числу ссылок на одну публикацию (31.3) они только третьи, по кумулятивному показателю цитирований всех публикаций превосходят остальной мир.

Тысячу и более цитирований за рассматриваемый период имели 140 нанопубликаций. В числе их авторов (соавторов) ученые из 15 стран. Наибольший вклад (103 публикации) внесли ученые 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). Две самые высоко цитируемые работы посвящены открытию углеродных нанотрубок (УНТ) ((Iijima, 1991) — 9864 ссылки) и фуллеренов ((Kroto et al., 1985) — 6930 ссылок). На 9-ом и 23-ем местах находятся две работы по графену, опубликованные российскими учеными из Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (ИПТМ) совместно с учеными из Англии ((Novoselov et al., 2004) — 3185 ссылок) и из Англии и Нидерландов (в журнале *Nature* за 2005 г.). На 38-ом месте статья ученых из Уфимского государственного авиационного технического университета о создании объемных нано-

Таблица 1. Средняя цитируемость публикаций по областям нанотехнологии и странам

	Полное «нано»	Фуллерены	Нанотрубки	Графен	Нанофотоника
Весь мир	—	22.2	29.0	42.3	20.5
США	31.3	42.7	47.6	56.7	32.4
Япония	18.8	20.7	31.3	18.3	24.1
Китай	12.8	8.0	17.8	20.0	8.2
Германия	23.1	27.4	33.2	48.9	23.4
Великобритания	24.3	34.1	35.1	133.2	37.2
Франция	21.6	18.9	38.7	61.9	20.3
Южная Корея	13.8	14.6	17.4	15.7	14.5
Италия	18.6	26.1	24.5	16.3	15.1
Швейцария	32.8	33.8	54.0	47.9	22.1
Испания	19.3	23.0	26.8	39.1	24.5
Канада	20.4	21.9	17.6	30.0	23.2
Нидерланды	33.7	40.1	86.1	107.5	34.7
Россия	9.9	7.3	13.1	131.1	14.3

структурных материалов методами интенсивной пластической деформации, опубликованная в 2000 году. В тематической структуре нанопубликаций, процитированных тысячу и более раз, преобладают работы, посвященные углеродным нанотрубкам (27%). Далее следуют полупроводниковые наноструктуры (17%), нанобиотехнология и наномедицина (12%).

Таковы основные исследовательские интересы мирового нанотехнологического сообщества в рассматриваемый промежуток времени. К очевидным тенденциям последнего периода относится графен: из десяти высоко цитируемых нанопубликаций с 2005 г. ему посвящены три самые высоко цитируемые. Среди российских нанопубликаций за этот же период, процитированных свыше ста раз, более половины также посвящены графену. Внимание к российским работам в значительной степени определяет сотрудничество (и соавторство) с нашими бывшими соотечественниками А. Геймом и К. Новоселовым, которые за «новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена» в 2010 г. получили Нобелевскую премию по физике. Уже вторая Нобелевская премия (первая — в 1996 г. по химии «за открытие фуллеренов») говорит об особой роли углеродных наноструктур для нанотехнологии, что подтверждает библиометрический анализ.

Начавшись с неориентированного фундаментального открытия (фуллерена), научная гонка в области углеродных наноструктур привела к созданию лучшего материала для нанотехнологии (УНТ и графена). Об интенсивности этой 25-летней гонки и, особенно, взрывном интересе к графену свидетельствуют графики, приведенные на рис. 3 и 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 и 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. занимает первое

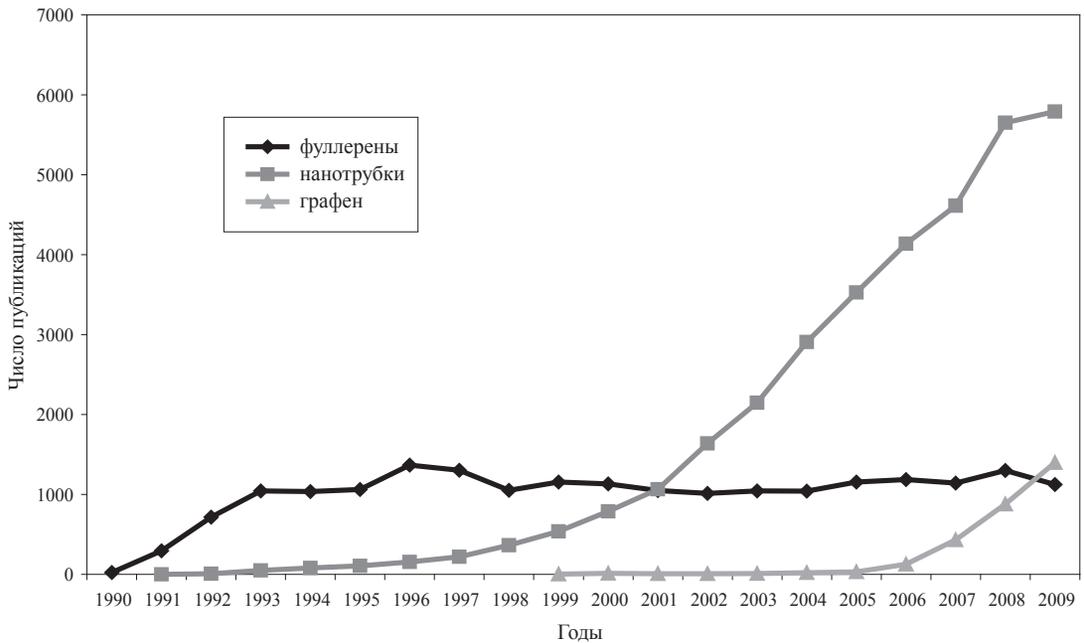


Рис. 3. Количество публикаций в области углеродных наноструктур по годам

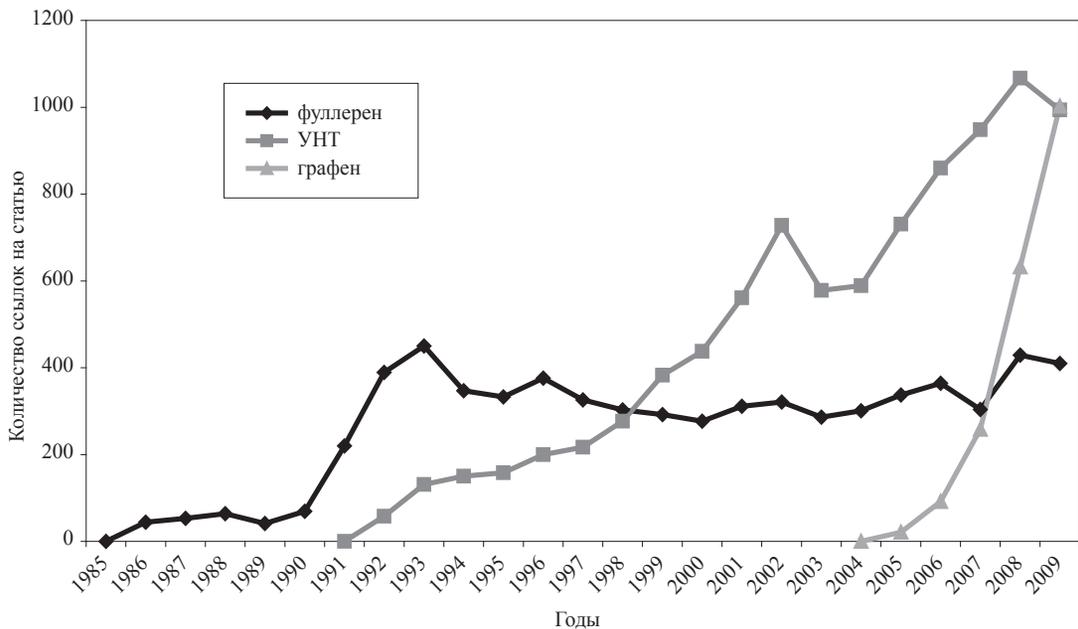


Рис. 4. Цитируемость публикаций, сообщающих об открытии фуллерена (Kroto et al., 1985), УНТ (Iijima, 1991), графена (Novoselov et al., 2004)

место. 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. Значительных результатов за тот же период добился Тайвань, достигший в 2008 г. 7-го места, а Индия пе-

реместила из второй десятки стран в первую. 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 4-ом месте. США с небольшими перерывами (уступая первенство по фуллеренам Японии, а по УНТ Китаю) — лидер 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 цитируемости по БД SCI-Expanded не столь впечатляющи, за исключением публикаций японских ученых по УНТ (см. табл. 1). «Элитный пул» составляют статьи ученых из США и ряда европейских стран.

В поиске и изучении новых форм углерода советская и российская научные школы традиционно удерживали высокую планку и нередко достигали опережающих результатов. Но не всегда они были замечены и вовремя поддержаны научными властями страны, будучи же поддержанными в случае с фуллеренами, они дали научную и практическую отдачу. Так, по количеству публикуемых работ в области изучения фуллеренов и их производных Россия с 1996 года занимала третье место, которое уступила Китаю лишь в 2005 году, а публикационный вклад РАН — самый большой среди научных организаций разных стран мира.

Однако, имея сразу вслед за японцами первые работы по УНТ, в дальнейшем мы упустили сдвиг мирового исследовательского тренда в их пользу (рис. 3) и оказались по количеству публикаций к 2009 г. лишь на 14-ом месте. Запоздав с принятием национальной нанотехнологической программы на 5–7 лет, мы не смогли достойно конкурировать с ведущими странами в области УНТ, ставшими «любимым дитя» государственной поддержки нанотехнологии. 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. Таким образом, разрыв от финансирования фундаментальных исследований до патентования изобретений нарастает кумулятивно. Несмотря на то что Россия идет второй (вслед за Великобританией) по среднему показателю цитируемости опубликованных работ (см. табл. 1), перспективы с графеном тоже далеко не ясны. Без опоры на достаточно сильную научную школу (лишь 11-ое место в мире по количеству публикаций в 2009 г.) это преимущество может прерваться эмиграцией одного–двух высокопродуктивных ученых. Таким образом, хотя ряд российских работ в области углеродных наноструктур, выполненных в институтах РАН и МГУ, имеет высокие показатели воздействия, поддерживать широкий фронт и высокий 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, что и отметил на Третьем Международном форуме по нанотехнологиям (Москва, 2010 г.) гендиректор ГК «Роснанотех» А. Б. Чубайс, признав, что в области углеродных наноструктур особых результатов у нас нет.

Невозможность успешно конкурировать по всему исследовательскому фронту, в частности, побуждает выявлять для приоритетной поддержки те направления, перспективы которых объективно обоснованы. На эту роль может претендовать, например, нанофотоника —

относительно новое быстро растущее направление НТ. Количество ежегодно публикуемых в мире работ по этой тематике выросло с 1999 по 2009 год в 7.3 раза, тогда как по НТ в целом — только в 5.4 раза. По этому показателю Россия не опускалась за данный период ниже 7-го места. Относительно высокой средней цитируемостью публикаций по нанофотонике (см. табл. 1) Россия в немалой степени обязана международным соавторским связям (примерно в 54% публикаций с российскими авторами), причем наиболее тесны эти связи с Германией (17% публикаций с российскими авторами), США (13%) и Великобританией (7%). Развитию международных связей (а Россия сотрудничает с тридцатью странами, включая все лидирующие) способствуют, в частности, наши бывшие соотечественники, работающие за рубежом. Десять российских ученых входят в первую сотню наиболее продуктивных в этой области авторов: пятеро из них представляют Физико-технический институт РАН (ФТИ), четверо — Международный лазерный центр МГУ и один — Центр фотохимии РАН. У двух ведущих центров отечественной нанофотоники есть хорошая база для кадровой подпитки — Научно-образовательный центр нанотехнологий ФТИ РАН и физический факультет МГУ. В целом, наиболее активно работы по нанофотонике ведутся в РАН (62% публикаций). Далее следуют МГУ (37%) и НПК «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» (3%). Среди мировых организаций по количеству публикаций РАН уступает лишь Академии наук Китая, значительно превосходя ее по показателю средней цитируемости.

В последнее время горячей темой становятся метаматериалы<sup>3</sup> — искусственные среды с электромагнитными свойствами, которых нет в природе. По оценке экспертов, их применение в трансформационной оптике способно привести к перевороту в разных областях науки и техники. Исследования по метаматериалам проводятся и в нашей стране, причем две работы, выполненные сотрудниками Института физики микроструктур и Института спектроскопии РАН, входят в выборку высоко цитируемых российских нанопубликаций (более 100 ссылок). Показатель средней цитируемости российских публикаций по метаматериалам (21.6) превосходит мировой (20.7). Таким образом, есть перспективные направления НТ, в которых у России, согласно библиометрическим показателям и кадровому обеспечению, достаточно хорошие позиции.

Тем не менее, преодолеть общий негативный тренд в ближайшие годы вряд ли удастся. Несмотря на стремительный рост инвестиций с 2007 года, вклад России в мировой научный выход в области НТ продолжает снижаться — так, по количеству нанопубликаций в БД SCI-Expanded на октябрь 2010 г. Россия уже 12-ая. А это означает, что в причинах отставания финансовый фактор уже не является главным, а все большую роль начинает играть кадровый барьер.

### 3. О кадровом ресурсе развития нанотехнологии

Для успешного соперничества в сфере НТ для России наиболее важна и приемлема линия опережающего развития, базирующаяся на генерации нового знания, которая предполагает наличие специально подготовленных национальных кадров исследователей (Третьяков, Гу-

<sup>3</sup> Наряду с УНТ, метаматериалы включены в десятку высших достижений в материаловедении за последние пятьдесят лет (Wood, 2008).

дили, 2009). К сожалению, в результате комплекса причин состояние, условия и возможности воспроизводства исследовательских кадров страны резко ухудшились. К моменту старта отечественной нанотехнологической программы мы располагали в этой области более продуктивным, чем в целом, сообществом исследователей: вклад российских ученых в мировой научный выход за 2004–2008 гг. составил 2.6% (Adams, King, 2010), а в мировой массив нанопубликаций — 3.9% (расчет автора статьи). Однако и здесь проблемы стоят весьма остро: в 2008 г. средний возраст научных работников РАН, дающей 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 году двенадцать ученых из России входили в мировую сотню самых продуктивных авторов, то в 2009 году их не было даже в числе первых 500.

Для более детального рассмотрения обратимся к данным РФФИ<sup>4</sup>. Участниками его проектов являются как опытные исследователи, так и еще учащаяся молодежь (студенты, аспиранты), что позволяет представить кадровую картину более динамично. Для анализа были отобраны 1353 исследовательских нанопроекта, стартовавших в 2006–2008 гг., участниками которых были около 8.7 тыс. человек. На рисунке 5 приведено их возрастное распределение, а также возрастное распределение участников нанопроектов, начавшихся в 2003–2005 гг. На кривых выделяются: молодежный «пик» с последующим «провалом» для 30–40-летних возрастов, небольшое возвышение на месте 50-летних и длинный послепенсионный «хвост»<sup>5</sup>. Проведенное долговременное исследование показало, что молодежный «пик» — в большой степени «проточное» образование, не дающее существенного пополнения в следующие возрастные категории (Алфимов и др., 2003). Порожденная Президентской инициативой рекламная шумиха вокруг НТ не создает устойчивой мотивации для молодежи, что косвенно подтверждают наши расчеты: 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%. Внутреннюю и внешнюю утечку умов, породившую разрыв научных поколений, вскоре дополнит ограничение их возможного притока в силу демографического фактора. С 2012 г. из вузов начинает выпускаться поколение 1990-х годов. Из-за демографической ямы, глубина которой измеряется двукратным падением рождаемости с 1987 по 1997 год, молодежный резерв науки в течение 10–15 лет будут пополнять ослабленные (количественно и качественно) возрастные когорты, что сократит базу подпитки для ученых средних возрастов. В результате разрыв поколений, нарушающий естественный цикл воспроизводства научных кадров, еще долго не удастся преодолеть. В условиях дефицита ученых средних возрастов послепенсионный «хвост» может на короткий срок послужить их замещением. Однако, в целом, научное сообщество с подобной возрастной структурой не способно быть продуктивным в длительной перспективе. Нельзя забывать и о международной конкуренции за научные таланты, преимущества в которой — эффективная образовательная система и благоприятные условия для творческой деятельности — в России тоже не на высоте. Научно-кадровый кризис станет главным препятствием развития нанотехнологии, которая

<sup>4</sup> Является одним из крупнейших в мире (по числу финансируемых проектов и их участников) научных фондов. Данные его электронного банка, в том числе о проектных коллективах и отдельных ученых, достаточно представительны для статистического анализа.

<sup>5</sup> Такая форма возрастного распределения характерна и для участников всех других проектов Фонда.

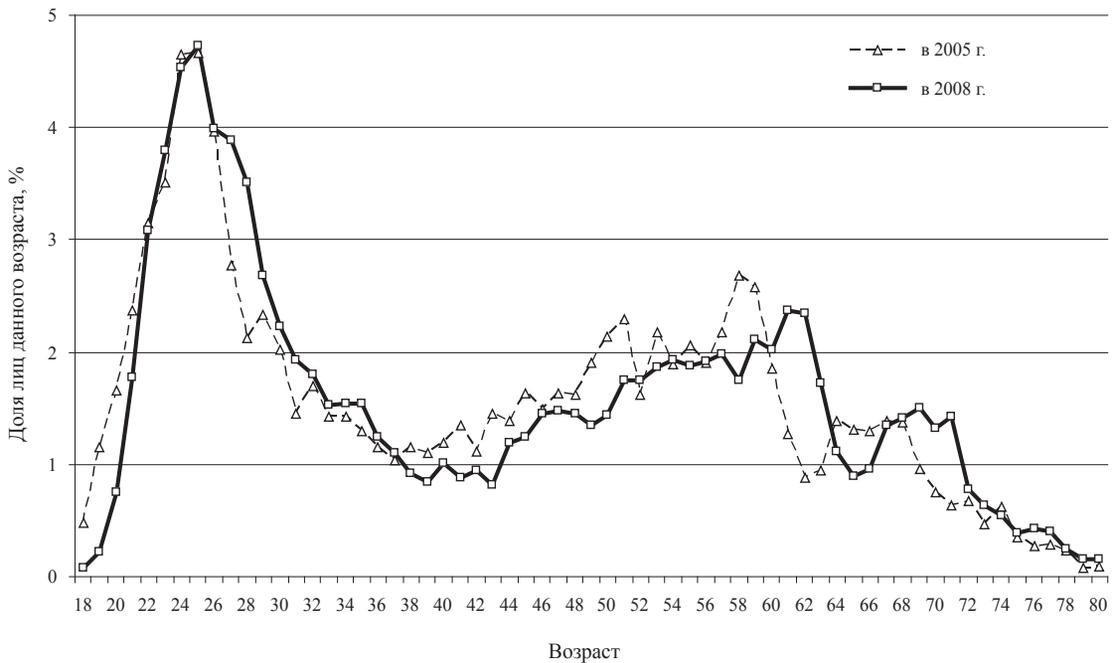


Рис. 5. Возрастное распределение участников нанопроектов РФФИ

объявлена локомотивом построения инновационной экономики в нашей стране. К сожалению, его не удастся преодолеть быстро, поскольку на создание (воссоздание) национальных исследовательских кадров достойного уровня уходят десятилетия даже при наилучших экономических условиях (Moravcsic, Gibson, 1979).

#### 4. Заключение

Знания и человеческий капитал становятся главными факторами развития новой экономики. Отсюда столь высоко внимание к производству научного знания, способного питать непрерывный поток инноваций (Макаров, 2003). Нанонауку и нанотехнологию считают ключевыми для построения экономики знаний в 21-ом веке. Это инициирует, в частности, проведение посвященных им масштабных наукометрических исследований, количество которых в мире измеряется десятками. Они вносят значительный вклад в изучение глобальных процессов развития нанотехнологии, оценку позиций разных стран в нанотехнологической гонке, позволяют правильно вырабатывать собственную стратегию. Россия не была среди первых стран, осознавших потенциал нанотехнологии и организовавших ее приоритетную поддержку на государственном уровне, поэтому информационно-аналитическая основа разработки решений у нас также отстает. И это относится не только к НТ. Доступ к мировым и отечественным базам данных в принципе позволяет, применяя средства информационного анализа и наукометрии, оперативно сформировать достаточно целостное и структурированное представление о состоянии и перспективах развития той или иной научной области или направления. Сложившаяся кризисная ситуация с исследовательскими кадрами для всестороннего изучения также требует квалифицированных измерений и моделирования.

## Список литературы

- Алфимов М. В., Минин В. А., Либкинд А. Н., Гохберг Л. М., Терехов А. И. (2003). Хроника распада. Наше научное сообщество не только стареет, но и теряет квалификацию. *Поиск*, 10 (720), 8–9.
- Макаров В. Л. (2003). Экономика знаний: уроки для России. *Вестник РАН*, 73 (5), 459–456.
- Терехов А. И. (2009). Анализ процессов развития нанотехнологии (на примере углеродных наноструктур). *Экономика и математические методы*, 45 (3), 12–27.
- Третьяков Ю. Д., Гудилин Е. А. (2009). Там, внизу, все еще очень много нанобума. *В мире науки*, 5, 56–61.
- Adams J., King Ch. (2010). *Global research report. Russia*. Thomson Reuters. Leeds.
- Huang C., Notten A., Rasters N. (2008). Nanotechnology publications and patents: A review of social science studies and search strategies. *UNU-MERIT Working Paper Series*, 2008–58.
- Iijima S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354 (6348), 56–58.
- Kroto H. W., Curl R. F., Smalley R. E., O'Brien S. C., Curl R. F., Smalley R. E. (1985). C-60 Buckminsterfullerene. *Nature*, 318 (6042), 162–163.
- Markusova V. A., Jansz M., Libkind A. N., Libkind I. A., Terekhov A. I. (2009). A bibliometric study of Russian R&D on nanotechnology. Proceedings of the 12th International Conference on Scientometrics and Infometrics (ISSI'09). July 2009, Rio de Janeiro (Brazil), 354–358.
- Moravcsic M. J., Gibson S. G. (1979). The dynamics of scientific manpower and output. *Research Policy*, 8 (1), 23–45.
- Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306 (5296), 666–669.
- Scientometrics (2007). 70 (3).
- Wood J. (2008). The top ten advances in materials science. *Materials Today*, 11 (1–2), 40–45.