

# Библиометрические индикаторы

## ИССЛЕДОВАНИЯ в области НАНОНАУКИ

1



М. Игами

В последние годы нанотехнологии и нанонаука привлекают к себе широкое внимание. Ожидается, что необычные свойства, демонстрируемые материалами на нанометровом уровне, окажут существенное влияние на развитие традиционных технологий. Благодаря широкому спектру применения нанотехнологии и нанонаука считаются одним из самых многообещающих направлений исследований и в будущем окажут значительное воздействие на экономику и социальную сферу.

<sup>1</sup> Данное исследование было бы невозможно без поддержки японского Национального института научно-технической политики (National Institute of Science and Technology Policy – NISTEP). NISTEP предоставил базу данных и оказал помощь в выявлении научных областей, на которых основывается наш анализ.

**В** статье предлагается новый библиометрический метод, который позволяет понять суть меняющегося характера научной деятельности и отслеживать динамику этих изменений. Особое внимание уделяется изучению междисциплинарного и международного аспектов развития нанонауки. В частности, предпринята попытка ответить на следующие вопросы:

- ▶ Какая существует связь между различными предметными областями нанонауки?
- ▶ Как оценить междисциплинарную природу нанонауки?
- ▶ Какие страны играют ведущую роль в нанонауке?
- ▶ Как измерить международные потоки знаний?

В нашем исследовании характер и интенсивность информационных взаимодействий (а они, в свою очередь, являются основой производства и обмена знаниями) оцениваются путем анализа цитирования. Выявление же совместных цитирований служит идентификации кластеров статей, посвященных смежным темам. Отличительной чертой такой методики является картирование научных областей, что дает целостную картину современной научной деятельности. В качестве источника информации использовалась коммерческая база данных Essential Science Indicators (ESI), предоставленная компанией Thomson Scientific Corp.

Проведенная работа со всей очевидностью продемонстрировала междисциплинарный характер нанонауки: рассмотренные научные статьи относятся к химии, физике, материаловедению, биологии и биохимии. Можно утверждать, что исследования в области нанонауки осуществляются путем взаимодействия ученых, ранее специализировавшихся на различных традиционных дисциплинах, и это – катализатор, стимулирующий дальнейшую научную кооперацию. Выявлены предпосылки для слияния нано- и бионауки: стало возможным вести речь о зарождении нанобионауки. Результаты показали, что наряду с учеными из стран ОЭСР значительную активность в области нанонауки проявляют их коллеги из государств БРИК – Бразилии, России, Индии и Китая; они быстрыми темпами наверстывают отставание в этой сфере.

## Как различные направления нанонауки связаны друг с другом? Картирование исследований

Путем анализа совместного цитирования выделены 133 научные области. На основе гравитационной модели (gravity model) была составлена карта, иллюстрирующая их взаимосвязь. С ее помощью

можно получить представление о перспективах научных исследований. В ходе последующего контент-анализа вышеупомянутые 133 области были разделены на 13 групп. Примерно половина из них относятся к биологическим наукам и медицине, что отражает структуру использованной базы данных; три категории связаны с нанонаукой и материалами (табл. 1).

Карта исследований в области нанонауки и материалов приведена на рис. 1. Каждый круг представляет какое-либо научное направление; размер его зависит от количества цитирующих статей. Чем больше круг, тем крупнее соответствующее направление. Положение кругов друг относительно друга показывает, насколько тесно связаны научные области; самые тесные связи, в которых нормализованная частота совместного цитирования превышает  $0.1 \times N_{\max}^{\text{norm}}$ , обозначены сплошными линиями.

К сфере нанонауки и наноматериалов относятся 32 области. Их можно разделить на три группы. Шесть областей, указанных в верхней части схемы, относятся к химическому синтезу. Эти исследования посвящены главным образом поиску эффективных методов катализа, и основная часть базовых статей<sup>2</sup> здесь принадлежит к химии. В частности, дендримеры (древовидные полимеры) могут применяться в сфере нанотехнологий для доставки лекарственных веществ к участку действия, а также в электронных устройствах; значит, эта тема (ID23) входит в категорию «Наноматериалы».

Девять научных направлений, расположенных в нижней части карты, касаются сверхпроводимости и квантовых вычислений. Большинство базовых статей в этой категории относится к физике. Исследования направлены на изучение и создание новых сверхпроводящих материалов и совершенствование устройств для квантовых вычислений.

В средней части схемы помещена категория научных исследований, связанных с наноматериалами – нанопроводниками, металлическими кластерами, органическими материалами и т.п. Сюда включены 12 областей. Как представляется, главную роль здесь играют исследования нанопроводников, молекулярных устройств и молекулярных проволок (ID569): налицо четыре прямые состыковки с другими направлениями.

Промежуточное положение «Наноматериалов» между «Химическим синтезом» и «Сверхпроводимостью и квантовыми вычислениями» наглядно иллюстрирует междисциплинарный характер этой группы. Область нанонауки и наноматериалов несколько тяготеет к бионаукам (см. верхнюю левую часть карты). Отсюда вытекает вывод о наличии определенных связей между указанными областями, хотя и не столь сильных, чтобы отнести их к единому направлению исследований. Пустая область между ними (обозначена пунктиром) может стать основой для появления нового научного

<sup>2</sup> Базовыми считаются статьи, которые цитируются в каждой из других статей по определенной научной дисциплине, а значит, отличаются единством исследуемой в них темы и играют ключевую роль в развитии соответствующей области науки.



Табл. 2. Информационная энтропия в отдельных областях нанонауки\*

Научные направления	Базовые статьи	Цитирующие статьи	H (базовые)	H (цитирующие)-H (базовые)
Химический синтез	6	728	0.12	0.21
Сверхпроводимость и квантовые вычисления	9	650	0.10	0.34
Нanomатериалы	13	1312	1.15	0.09

\* Здесь и далее анализ цитирующих статей выполнен специалистами NISTEP [NISTEP, 2006] на основе данных Индекса научного цитирования (Science Citation Index), опубликованного на CD-ROM (1999–2004).

Источник: [OECD/DSTI, 2006], расчеты автора.

направления (его можно было бы назвать, например, нанобиологией). Уже существует дисциплина «Микроанализ биохимических веществ» (ID508). Речь идет об изучении малых полей биохимических реакций и создании «чиповых лабораторий» (Lab-on-chip). Более того, некоторые разработки в сфере наноматериалов включают такую тему, как «Исследование чувствительности анионов» (ID553). Если провести аналогичный анализ применительно к более свежим данным, то можно будет увидеть новые направления исследований в бионанонауке.

### Междисциплинарный характер нанонауки: количественная оценка информационной энтропии

Научные статьи собраны в базу данных ESI из примерно 6 тыс. журналов, публикуемых по всему миру. Журналы сгруппированы по 22 областям с целью анализа распределения базовых и цитирующих статей по направлениям. Число таких направлений служит характеристикой междисциплинарной природы исходных областей науки.

Уровень междисциплинарных связей в рамках различных направлений научных исследований определяется посредством оценки информационной энтропии [Shannon, 1948]. Обычно таким образом измеряется степень случайности (или не-

достоверности) информации. Информационная энтропия рассчитывается по следующей формуле:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p(i) \ln p(i), \quad (1)$$

где  $p(i)$  – доля направления  $i$  в составе базовых или цитирующих статей, относящихся к данной категории. Если базовые либо цитирующие статьи входят лишь в одно направление, уравнение (1) равно нулю. Максимального значения уравнение (1) достигает в случае, когда все направления представлены равными долями, т. е.  $p(i) = 1/22$ .

Результаты такого анализа во многом зависят от исходного выбора направлений. Двадцать две дисциплины из ESI представляются вполне рациональной классификацией, основанной на значительном количестве научных журналов. Таким образом, уравнение (1) используется в качестве индикатора для измерения уровня междисциплинарности научных областей.

Информационная энтропия нанонауки и наноматериалов представлена в табл. 2. Незначительный ее уровень в таких категориях, как «Химический синтез» и «Сверхпроводимость и квантовые вычисления», свидетельствует о преобладании одного направления исследований. В группе «Химический синтез» в основном используются знания, полученные химиками; в группе «Сверхпроводимость и квантовые вычисления» преобладает физика. Можно утверждать, что категории, в ко-

Рис. 2. Распределение базовых статей в отдельных областях нанонауки по научным направлениям (%)



Источник: [OECD/DSTI, 2006], расчеты автора.

торых доминирует какая-либо одна область науки, обычно тяготеют к традиционным дисциплинам (рис. 2а, б).

Напротив, информационная энтропия в категории «Наноматериалы» растет, что свидетельствует о высоком уровне междисциплинарности исследований. По сути дела, эта дисциплина представляет собой совокупность знаний, созданных в самых разных областях. Наибольшая доля принадлежит химии, за ней идут материаловедение и физика (рис. 2с). Следует отметить, что биология и биохимия также представлены в данной категории (например, исследования по использованию молекул ДНК в нанопроводниках и синтез гибридных материалов, основанных на ДНК-металлических частицах). Динамика информационной энтропии в базовых и цитирующих статьях практически одинакова, что обуславливает незначительную разницу в показателях энтропии.

Наши выводы отличаются от приведенных в литературе ранее. Так, Дж. Шуммер пришел к мнению, что «в современных наноисследованиях не наблюдается никаких особенных закономерностей или признаков междисциплинарности, а их кажущаяся многодисциплинарность сводится к наличию различных, преимущественно монодисциплинарных областей, мало связанных друг с другом и не имеющих между собой практически ничего общего, кроме приставки “нано”» [Schummer, 2004]. Эти результаты получены им на основании анализа соавторства работ, написанных учеными, специализирующимися в разных областях. Причем были проанализированы восемь журналов, посвященных исключительно нанонауке и нанотехнологиям. Похоже, количественная оценка уровня междисциплинарности научных исследований сама по себе является предметом дискуссии.

## Какие страны играют заметную роль в нанонауке?

В качестве индикатора специализации той или иной страны в определенной области науки выступает ее удельный вес в общем числе базовых и цитирующих статей. В нашей работе структура авторства базовых статей используется для оценки качества научных исследований, а структура авторства цитирующих статей служит индикатором их количества.

Указанные доли анализировались нами с помощью метода подсчета целых чисел. При таком подходе национальная принадлежность статей засчитывалась в том случае, если в списке адресов учреждений, в которых работают их авторы, хотя бы однажды указывалась данная страна (без учета гражданства авторов). В результате сумма долей стран превышает 100%.

Иногда встречается и другой вариант расчета – дробным методом. В этом случае вклад определенного научного учреждения оценивается как удельный вес в общем их числе. Иначе говоря, если есть десять научных институтов и два из них находятся в интересующей нас стране, удельный вес этой

страны считается равным 0.2. В итоге, общая сумма долей стран всегда равна 100%. В литературе приводится ряд примеров, иллюстрирующих различия между этими методиками [Rousseau, 1992; Gauffriau, Larsen, 2005].

На рис. 3 показан удельный вес стран ОЭСР, БРИК, АСЕАН+3 и Тайваня применительно к базовым и цитирующим статьям по трем категориям дисциплин, связанных с нанонаукой и наноматериалами. Во всех трех областях самые высокие доли в числе базовых статей принадлежат США, что свидетельствует об их доминирующем положении. Однако в отношении цитирующих статей позиции США несколько ниже. Пятнадцать стран ЕС имеют высшие значения индикаторов авторства в области химического синтеза, сверхпроводимости и квантовых вычислений. В категории «Наноматериалы» налицо острая конкуренция между учеными из США, ЕС-15 и АСЕАН+3. Максимальная доля среди цитирующих статей у стран АСЕАН+3. США тем не менее лидируют в отношении качества научных публикаций.

Страны БРИК занимают четвертое место по цитирующим статьям во всех рассматриваемых областях, главным образом за счет Китая. Число цитирующих статей в два-четыре раза превышает количество базовых. Из этого следует, что в настоящий момент страны БРИК находятся на стадии интенсивного наверстывания исследований в сфере нанонауки и наноматериалов.

На уровне отдельных государств Япония имеет второй результат по авторству базовых статей в категориях «Сверхпроводимость и квантовые вычисления» и «Наноматериалы». У Германии второй по величине удельный вес авторства базовых статей в области химического синтеза. Китай уже вошел в число лидеров по авторству цитирующих статей – второй результат в категории «Наноматериалы». Это означает, что необходимо учитывать его роль при анализе процессов создания знаний в сфере нанонауки и наноматериалов.

## Как измерить международные потоки знаний?

### Международное соавторство

В число измерителей трансграничных потоков знаний входят индикаторы международного соавторства. Имеется в виду коэффициент международного соавторства, который показывает, как знания распространяются по странам. Показатель для данной страны рассчитывается как отношение числа принадлежащих ей статей, написанных с участием соавторов из других государств, к страновому массиву статей.

Динамика количества цитирующих статей (с разбивкой по областям науки) показана на рис. 4. Коэффициент международного соавторства варьирует по научным дисциплинам: наивысший показатель – в области сверхпроводимости

Рис. 3. Удельный вес стран ОЭСР, БРИК, АСЕАН+3 и Тайваня в структуре авторства базовых и цитирующих статей в отдельных областях нанонауки (%)

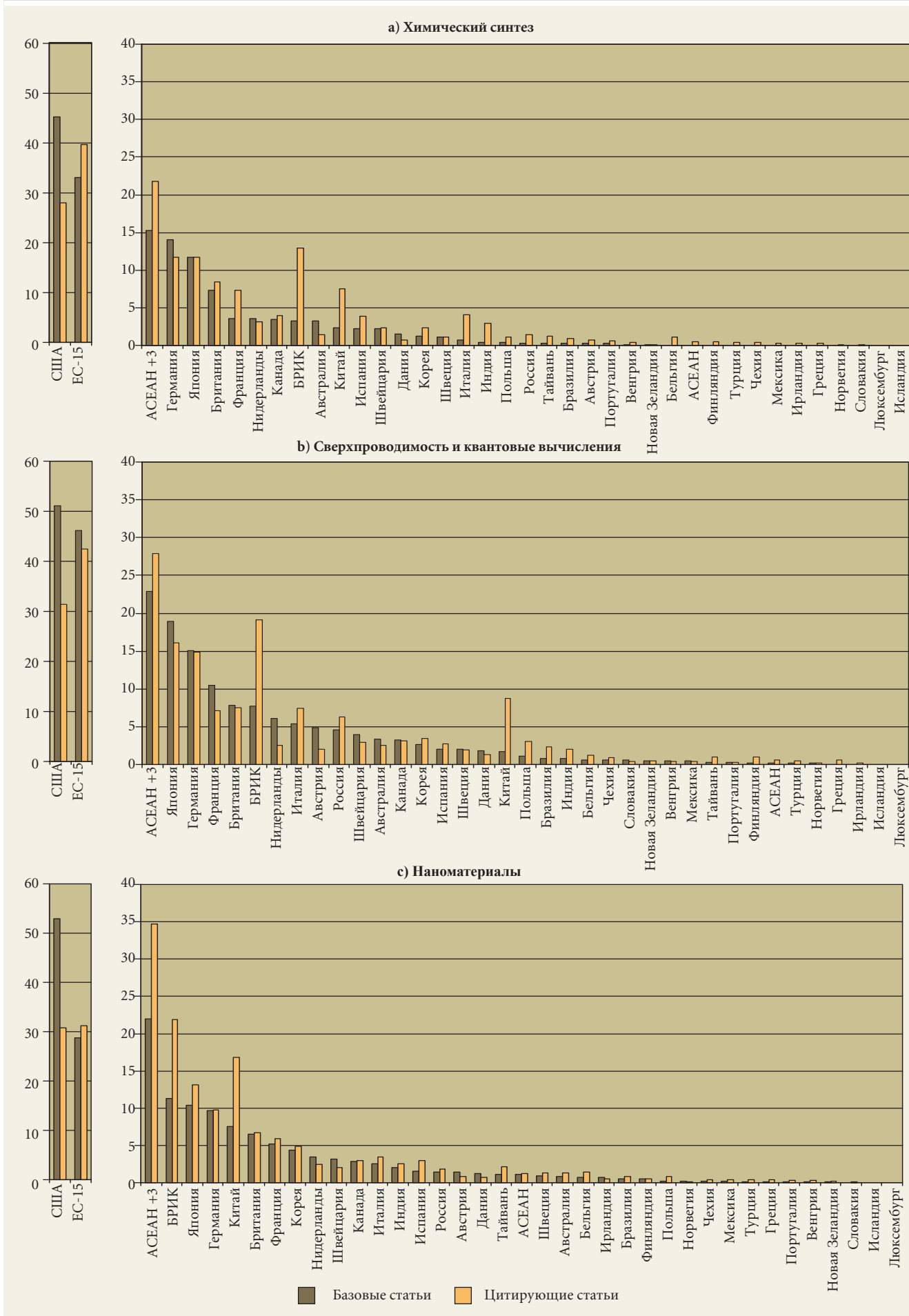
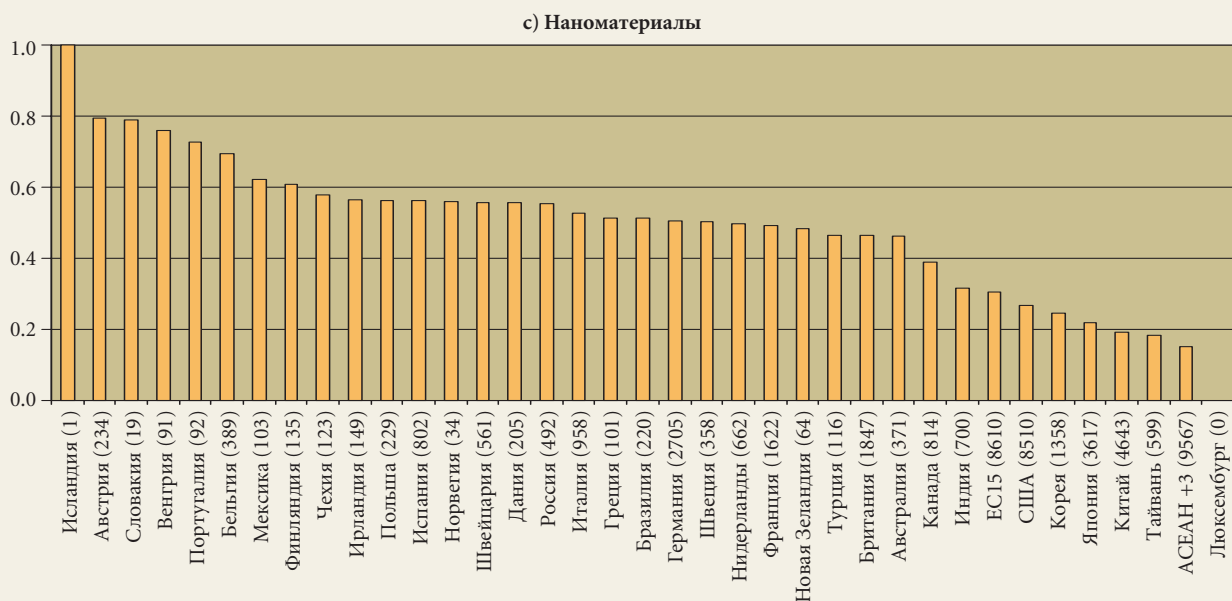
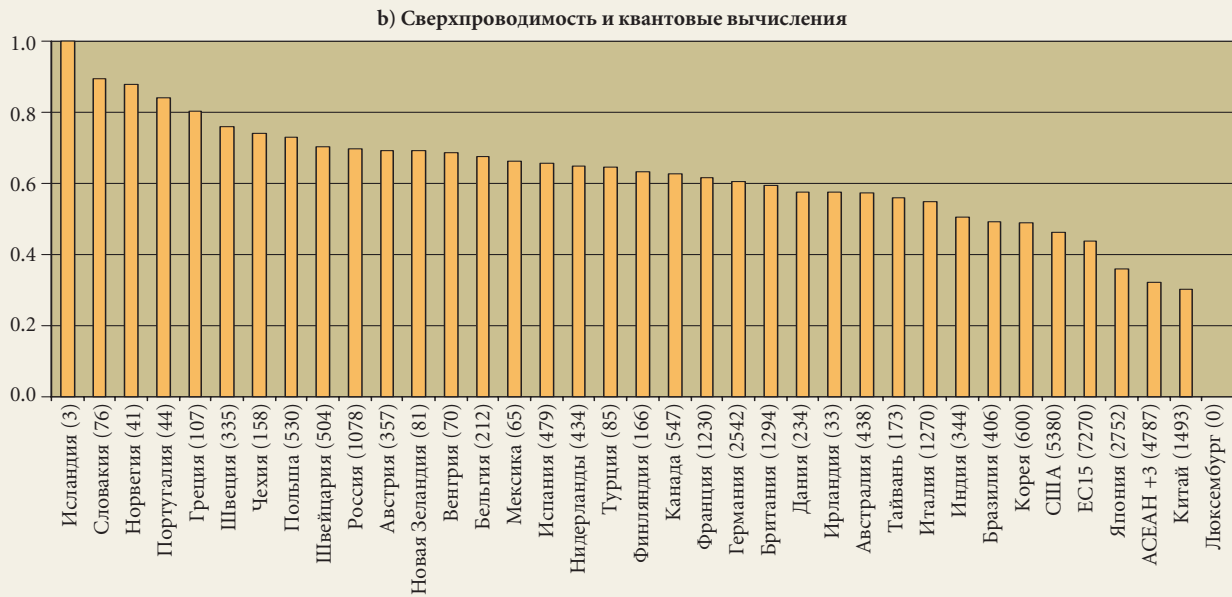
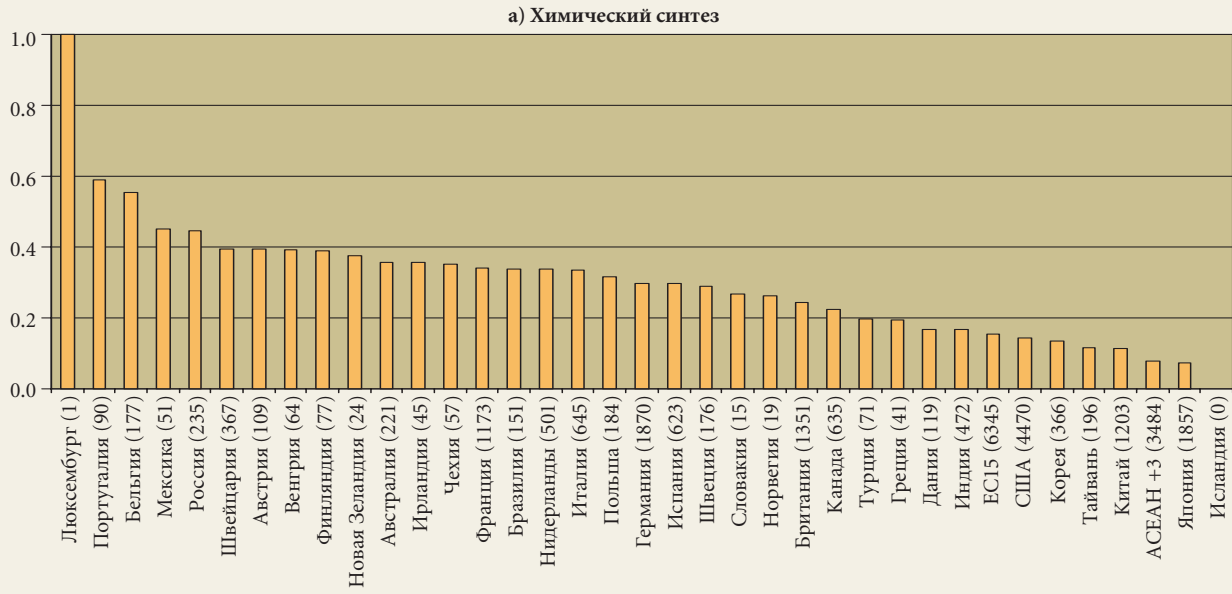


Рис. 4. Доля статей с международным соавторством в составе цитируемых статей в отдельных областях нанонауки (коэффициенты международного соавторства, в долях единицы)



и квантовых вычислений; далее следуют наноматериалы и химический синтез. Заметим, что в азиатских странах более низкий коэффициент международного соавторства, чем в Европе. Это свидетельствует об активной конкуренции азиатских стран друг с другом, что ведет к локализации потоков знаний внутри национальных границ.

Среди отдельных стран ЕС, особенно в государствах, где общее количество статей невелико, уровень международной кооперации довольно высок, но для ЕС в целом индикаторы внешнего взаимодействия с другими странами столь же низки, как и в Азии. Очевидно, что международное сотрудничество европейских ученых сводится преимущественно к их кооперации друг с другом и потоки знаний ограничиваются пределами Европейского Союза. В Соединенных Штатах в силу наличия собственной достаточно разносторонней научной базы международная кооперация также не получила особого развития.

### Институциональное разнообразие: исследовательские сети

Разнообразие и открытость исследовательских сетей – ключевые факторы успеха инновационного развития стран. Одной из главных целей Седьмой Рамочной программы ЕС является углубление научного сотрудничества и создание Европейского исследовательского пространства. С другой стороны, Соединенные Штаты обеспечивают необходимую диверсификацию за счет кооперации ученых в пределах собственных границ. Все страны и регионы стараются добиться многообразия научных исследований различными способами. Анализ научных сетей на институциональном уровне помогает понять закономерности организации потоков знаний.

Количественную оценку институциональной диверсификации можно осуществить с помощью индексов кооперации и проиллюстрировать в виде схемы, отражающей связи между организациями. Индекс кооперации двух организаций рассчитывается по формуле, близкой к той, что применялась для расчета уровня совместного цитирования:

$$r_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sqrt{n_i} \sqrt{n_j}}, \quad (2)$$

где  $n_i$  – количество статей, в списке авторов которых указан хотя бы один адрес организации  $i$ ;  $n_{ij}$  – количество статей, соавторами которых выступали ученые из организаций  $i$  и  $j$ . Были рассмотрены базовые статьи.

Связи между организациями, занимающимися научными исследованиями в области сверхпроводимости и квантовых вычислений, показаны на рис. 5а. Организации обозначены кружками, взаимное расположение кружков демонстрирует уровень взаимодействия между ними. Самые сильные связи обозначены сплошными линиями, а те, нормализованная частота которых превышает  $0.1 \times N^{\text{norm}}_{\text{max}}$ , – пунктирными.

На схеме представлены 54 организации, сотрудники которых написали максимальное количество научных статей. Двадцать две из них находятся в США, шестнадцать – в Европе, двенадцать – в Азии. Значительное количество научных учреждений из США свидетельствует о высокой степени институционального разнообразия в этой стране. В Европе максимальное количество базовых статей было опубликовано учеными, работающими в Институте Макса Планка; Иннсбрукском университете; Национальном институте физики материи (National Institute for the Physics of Matter – INFN); французском Комиссариате по атомной энергии (Commissariat à l’Energie Atomique – CEA) и Мюнхенском университете. Самое же большое число базовых статей издано сотрудниками Токийского университета; вслед за ним идут Институт Макса Планка и Массачусетский технологический институт. За исключением единственного корейского университета – Поханского университета науки и технологий (Pohang University of Science and Technology), все азиатские организации, представленные на схеме, находятся в Японии.

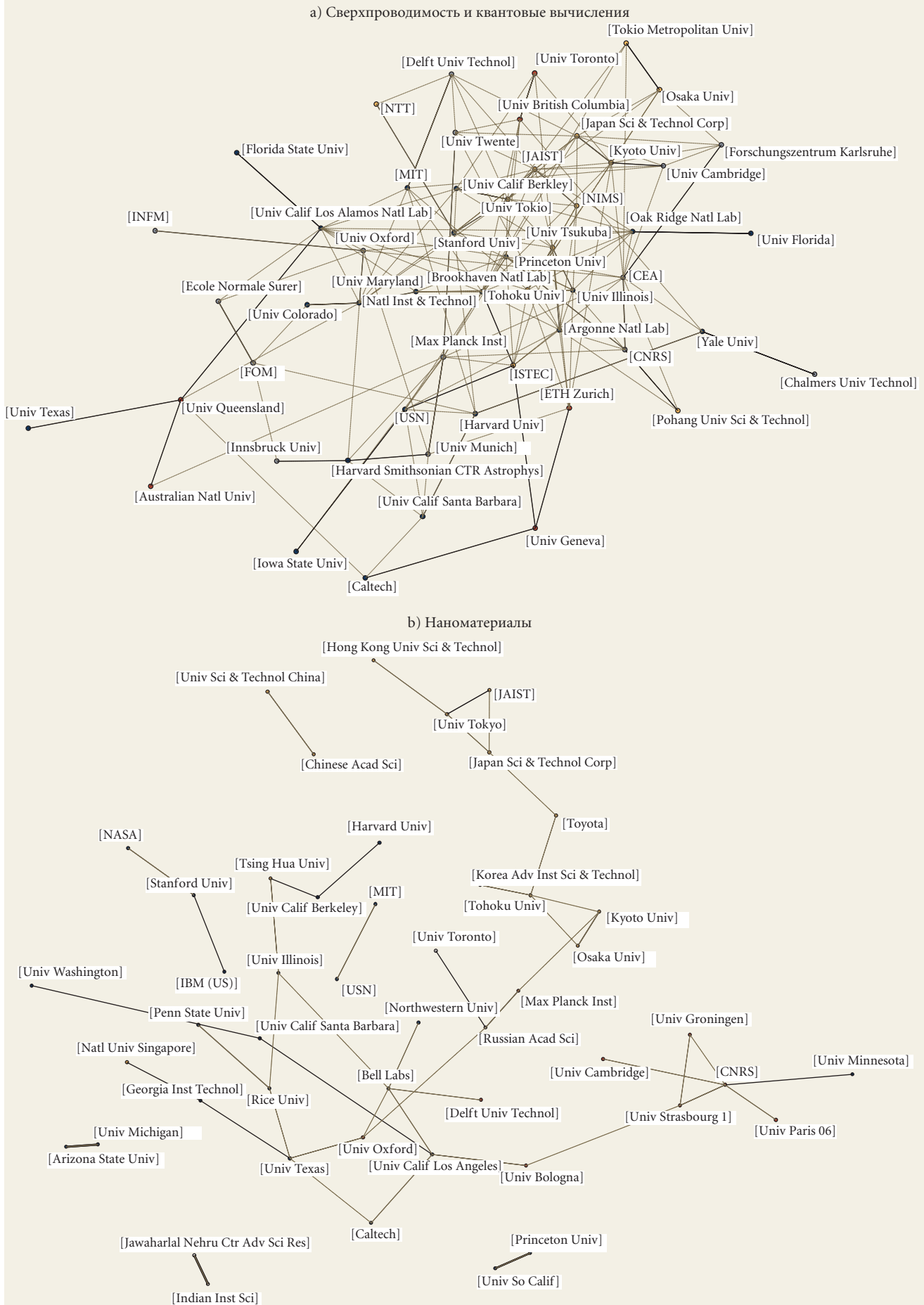
Интенсивные связи означают активное соавторство в конкретной сфере научных исследований. Следует обратить внимание на то, что ряд японских университетов тесно связаны с научными сетями в США. Особенно интенсивные взаимодействия наблюдаются между Токийским и Калифорнийским (Беркли) университетами, Токийским и Стэнфордским университетами, Университетом Тохоку и Брукхейвенской национальной лабораторией.

На рис. 5б приведена картина совместных исследований по наноматериалам. Сюда включены организации, опубликовавшие максимальное количество базовых статей в данной дисциплине; 23 из них сосредоточены в США, 11 – в Европе и 15 – в Азии. Связи между ними не столь развиты, как это происходит в области сверхпроводимости и квантовых вычислений. Французский Национальный центр научных исследований (National Centre for Scientific Research – CNRS) без сомнения является центром превосходства в сети европейских научных организаций – он обладает обширными связями с другими исследовательскими центрами. Сотрудничество между учеными Японии, Кореи, Китая и Индии менее активно. На схеме представлена лишь одна линия связи – между Университетом Тохоку и Корейским институтом передовых научно-технических исследований. Что касается потоков знаний между различными секторами, то, поскольку в сеть входит ряд компаний, можно сделать вывод о наличии активного обмена знаниями между государственными организациями и промышленностью.

Следует подчеркнуть вклад научных организаций из стран БРИК в международную научную кооперацию. На схеме их семь. Страны БРИК играют все более важную роль в производстве и обмене знаниями в области наноматериалов, хотя их связи с другими государствами пока не слишком интенсивны.



Рис. 5. Международные связи университетов и институтов, ведущих научные исследования в отдельных областях наноуки



Источник: (OECD/DSTI, 2006), расчеты автора.

Картину совместных исследований в области химического синтеза представить не удалось ввиду крайне слабых связей между действующими в ней организациями.

## Основные выводы для дальнейшей работы

Подводя итоги, отметим, что нанонаука имеет междисциплинарный характер. Так, исследования в области наноматериалов базируются на стыке традиционных дисциплин, развиваясь благодаря взаимодействию ученых, ранее специализировавшихся в тех или иных отраслях науки. Это ведет к получению совершенно новых результатов и открывает новые перспективы исследований. Междисциплинарный характер исследований в области наноматериалов подтверждается ее положением на карте научных направлений: она располагается между физикой и химией. Поскольку картирование строится на результатах анализа совместного цитирования, то это свидетельствует о кооперации физиков и химиков.

Наша схема также выявила предпосылки к образованию нанобиологии. Типичный пример – исследование в области микроанализа биохимических субстанций. Ряд базовых и цитирующих статей, посвященных нанотехнологиям и наноматериалам, написаны биологами и биохимиками. Работы по использованию молекул ДНК в нанопроводниках и синтез гибридных материалов на основе ДНК-металлических частиц демонстрируют зарождение новых научных направлений, охватывающих биологию и биохимию. Нанобиология пока не выделилась в отдельное направление, однако, скорее всего, это произойдет, и она, подобно наноматериалам, станет самостоятельной научной областью.

Нанонаука имеет международный и межрегиональный характер. США занимают доминирующее положение практически во всех рассматриваемых направлениях, хотя не следует забывать о смещенном характере исходной базы данных (в ней завышена доля американской научной литературы). Доминирование США особенно заметно в категориях «Бионаука» и «Здравоохранение». Однако лидерство американских ученых в области нанотехнологий

и наноматериалов начинает ослабевать благодаря растущей активности других игроков. США обеспечивают необходимый уровень разносторонности через сотрудничество ученых в пределах собственных границ. Способность привлечь и сохранить качественные человеческие ресурсы будет иметь определяющее значение для сохранения ведущего положения США в данной сфере, особенно в направлениях, не связанных с науками о жизни.

Хотя удельный вес отдельных европейских стран меньше, чем США, но агрегированная доля 15 стран Европейского Союза сопоставима с американской. Собственно, 15 стран ЕС обладают максимальным показателем цитирования в категориях «Химический синтез» и «Сверхпроводимость и квантовые вычисления», что говорит об аккумуляции знаний и человеческих ресурсов и, в свою очередь, обеспечит получение инновационных результатов в этих областях в будущем. Высокий коэффициент международного соавторства является индикатором активного обмена знаниями в пределах ЕС. При этом потоки знаний, похоже, ограничены границами Европейского Союза.

Страны БРИК активно догоняют США и ЕС. Значительный разрыв в показателях авторства базовых и цитирующих статей, скорее всего, свидетельствует о нехватке ведущих исследователей. Поскольку развитые государства Азии – Япония и Корея – весьма сильны в указанных областях, портфель азиатских стран смещен в сторону дисциплин, не входящих в состав наук о жизни. Более того, низкий коэффициент международного соавторства свидетельствует о локализации полученных знаний в отдельных странах. Это резко контрастирует с развитой европейской научно-исследовательской сетью. Углубление международного сотрудничества способствовало бы активизации присутствия азиатских стран в мировом научном пространстве.

В настоящее время нанотехнологии и нанонаука находятся в стадии быстрого развития, с вовлечением различных игроков и научных дисциплин. При разработке индикаторов для количественной оценки ситуации в данных областях следует ориентироваться на перспективу и обеспечивать необходимую гибкость. Одним из вариантов может стать использование методики форсайта [NISTEP, 2005b]. ■

- Gauffriau M., Larsen P.J. Counting Methods are Decisive for Rankings Based on Publication and Citation Studies / *Scientometrics*, 2005, v. 64, № 1, p. 85-93.
- NISTEP (2005a). The 8th Science and Technology Foresight. Study on Rapidly-developing Research Area. National Institute of Science and Technology Policy Report № 94 (in Japanese).
- NISTEP (2005b). Comprehensive Analysis of Science and Technology Benchmarking and Foresight. National Institute of Science and Technology Policy Report № 99.
- Development of a New Bibliometric Analysis Assessing Scientific Activities. NISTEP, 2006 (mimeo).
- Rousseau R. Breakdown of the Robustness Property of Lotka's Law: The Case of Adjusted Counts for Multiauthorship Attribution/ *Journal of the American Society for Information Science*, 1992, v. 43, № 10, p. 645-647.
- Schummer J. Multidisciplinarity, Interdisciplinarity and Patterns of Research Collaboration in Nanoscience and Nanotechnology / *Scientometrics*, 2004, v. 59, № 3, p. 425-465.
- Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication / *The Bell System Technical Journal*, 1948, v. 27, p. 379-423, 623-656.
- Small H., Sweeney E. Clustering the Science Citation Index using Co-citations. I. A Comparison of Methods / *Scientometrics*, 1985, v. 7, p. 3-6, 391-409.
- Small H., Sweeney E., Greenlee E. Clustering the Science Citation Index using Co-citations. II. Mapping Science / *Scientometrics*, 1985, v. 8, p. 5-6, 321-340.