

## ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ РОССИИ В ПОЯВЛЯЮЩИХСЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

© 2022 г. А. И. Терехов

Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

E-mail: a.i.terekhov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Статья посвящена библиометрическому анализу развития исследований в двух новых высокотехнологичных направлениях — нанофотонике и квантовой обработке информации. В центре внимания автора — количество рецензируемых публикаций, рассматриваемых на уровне стран и их групп, международная научная кооперация, показатели цитирования. Рассматривается структура международной соавторской сети в квантовой обработке информации, обсуждается ряд аспектов взаимодействия глобальной и национальных научных систем.

С применением библиометрических методов выявлены основные участники исследований по обоим направлениям, оценены их вклад в мировой поток публикаций и доля в нём международных соавторских публикаций. Показано, что рост исследований в период 2000–2017 гг. происходил в большей степени на глобальном уровне, центром притяжения для сотрудничества были страны из группы G7, а в наиболее сплочённое ядро соавторской сети по квантовой обработке информации, помимо G7, вошли Швейцария, Швеция и Россия. Существенно, что по обоим направлениям Россия значительно превзошла целевые показатели как вклада в мировой научный результат, так и доли международных соавторских работ.

*Ключевые слова:* нанофотоника, квантовая обработка информации, научные исследования, научная кооперация, международная соавторская сеть, библиометрический анализ.

DOI: 10.31857/S0869587322010091

Активное формирование глобальной научной системы с начала 1990-х годов привлекло повышенное внимание учёных к проблемам развития науки, количественному изучению её динамики и структуры, включая конкуренцию и кооперацию, соотношение общемировой и национальных научных систем. Важным объектом интереса стало острое научное соперничество на пе-

реднем крае исследований, в частности, в области нанотехнологий, которое явило наглядный пример научной глобализации. В настоящей статье внимание будет уделено двум быстро развивающимся высокотехнологичным направлениям — квантовой обработке информации (КОИ) и нанофотонике (НФТ), которые пока ещё не получили должного отражения в наукометрической литературе.

*Квантовая обработка информации* — междисциплинарная область, в рамках которой изучается то, как информация собирается, преобразуется и передаётся на квантовом уровне — в атомах, ионах, фотонах, элементарных частицах и микроскопических твердотельных системах [1]. Квантовые компьютеры, квантовые каналы связи и квантовые датчики представляют собой те устройства, которые способны достигать конечных пределов обработки информации. О последствиях объединения квантовой механики с классической машиной Тьюринга учёные задумались более 40 лет назад [2]. Взрывной интерес к КОИ в



ТЕРЕХОВ Александр Иванович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ЦЭМИ РАН.

начале 1990-х годов стимулировали несколько совпавших обстоятельств: было показано, что квантовый компьютер мог бы с высокой эффективностью факторизовать, то есть разложить очень большие числа в произведение простых множителей (что важно, например, в криптографии); пришло осознание того факта, что согласно закону Мура усовершенствование компьютеров довольно скоро достигнет квантового предела; ряд достижений физики сделал возможным говорить о построении работоспособных устройств квантовой логики. Кроме того, потребность в безопасных коммуникациях привела к изучению возможности создания защищённых схем квантовой связи.

К началу 2000-х годов идея квантовых вычислений стала представляться практически достижимой, что положило начало мировой гонке за “квантовое будущее”. В её фокусе — стремление к “квантовому превосходству” и создание универсального квантового компьютера. Разработка защищённой квантовой связи, по существу, выдвинулась в число проблем национальной безопасности. Хотя многие из решаемых сегодня задач уже находятся на стадии инженерных решений, по оценкам [1], фундаментальные исследования будут продолжать играть основополагающую роль в этой области.

*Нанопотоника* — одно из ответвлений нанотехнологий, возникшее в начале 2000-х годов как фронт исследований, относящихся к взаимодействию света с наноструктурированными материалами. Драйвером роста этого направления стали открывшиеся новые возможности в таких приложениях, как светодиоды и солнечные батареи, медицинская терапия и диагностика, ультрабезопасные коммуникации и хранение данных [3], а также в военной сфере [4].

Хотя определённая часть исследований по обоим направлениям не публикуется в открытых источниках, несомненно, полезно рассмотреть процессы формирования их научной основы через призму библиографических баз данных, в частности, наиболее авторитетной в мире политематической базы данных Science Citation Index Expanded (БД SCIE). Здесь представлены результаты библиометрического анализа развития КОИ и НФТ в мире в период 2000–2017 гг. с оценкой вклада и позиций России в этих областях. В центре внимания — публикационная активность на уровне стран/групп стран, международное сотрудничество и цитируемость публикуемых исследований.

Как известно, база данных Web of Science (WoS) выбрана Минобрнауки России в качестве основной для оценивания результатов исследований российских учёных на международном уровне. Согласно указу президента РФ № 599 (от 07.05

2012 г.) была поставлена задача к 2015 г. увеличить долю российских публикаций в этой БД до 2.44%, а по указу № 204 (от 07.05.2018 г.) к 2024 г. Россия должна входить в Топ-5 стран в приоритетных для неё областях научно-технологического развития, в число которых вписываются оба рассматриваемых нами направления [5, пункт 20a]. Ещё один целевой индикатор — “доля статей в соавторстве с иностранными учёными в общем числе публикаций российских авторов, индексируемых в международных системах научного цитирования” — должен достигать к 2024 г. 29.6% [6, приложение 1, пункт 33]. Попытаемся сопоставить эти официальные установки с реальным положением дел в КОИ и НФТ.

С этой целью из БД SCIE извлечены две выборки публикаций (типа *article*, *review*, *proceedings paper*, *letter*): 1) все публикации из тематических журналов по квантовой обработке информации (“*Quantum Information & Computation*”, “*Quantum Information Processing*”, “*International Journal of Quantum Information*”, “*npj Quantum Information*”) и нанопотонике (“*Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*”, “*Journal of Nanophotonics*”, “*Nanophotonics*”); 2) публикации, отобранные из других журналов БД SCIE путём поиска по ключевым терминам. Всего за период 2000–2017 гг. было отобрано 47 694 публикации, релевантные тематике КОИ, и 40 691 — тематике НФТ. Полученные выборки использованы в качестве исходных, необходимые для анализа библиометрические индикаторы рассчитаны с помощью сервисов платформы Web of Knowledge и вычислительных процедур в Excel.

#### ДИНАМИКА КОЛИЧЕСТВА ПУБЛИКАЦИЙ И ОСНОВНЫЕ УЧАСТНИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно рисунку 1, оба рассматриваемых направления — КОИ и НФТ — показывают достаточно динамичный рост, хотя несколько уступают углеродным наноструктурам. Тем не менее по количеству опубликованных исследований они уже обошли такое укоренившееся направление нанотехнологий, как полупроводниковые наноструктуры.

По каждому из направлений в исследованиях, хотя бы минимально, участвовали более сотни стран, однако значимых участников (с числом публикаций  $\geq 100$ ) было гораздо меньше: 46 по квантовой обработке информации и 41 по нанопотонике. Статусный характер обеих научных “гонок” подчёркивает присутствие в лидирующей составе всех промышленно развитых стран из группы G7 (табл. 1 и 2). Пять из них (кроме США и Франции) специализируются в области КОИ (см. табл. 2), в НФТ — только Япония. Более других НФТ занимается Сингапур, за которым

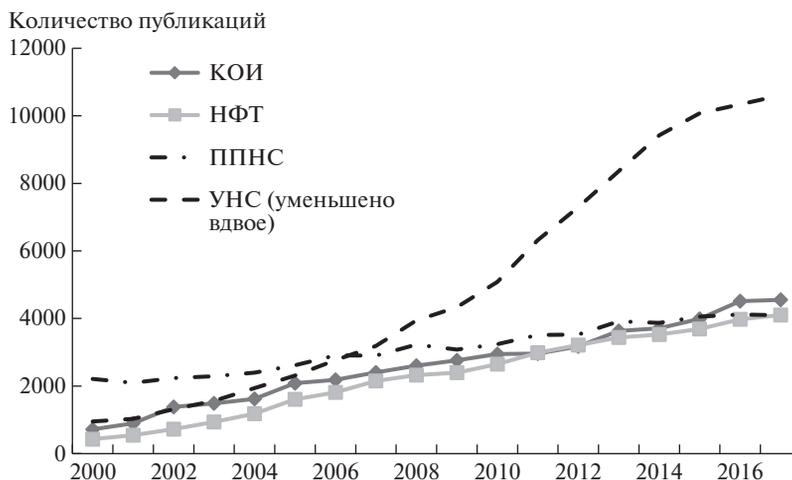


Рис. 1. Сравнительная динамика количества публикаций по квантовой обработке информации (КОИ) и нанофотонике (НФТ), а также полупроводниковым и углеродным наноструктурам (ППНС и УНС)

Таблица 1. Библиометрические показатели наиболее продуктивных в области НФТ стран (упорядочены по количеству публикаций за период 2000–2017 гг.)

Место в общем рейтинге стран: за весь период/ в 2017 г.	Страна	Количество публикаций (доля в общем объёме), %	Индекс специализации*	Среднегодовой темп роста (CAGR) в период 2008–2017 гг.	Доля публикаций с международным соавторством, %
1/1	Китай	11569 (28.4)	2.2	13.3	21.5
2/2	США	8846 (21.7)	0.8	4.0	38.9
3/4	Япония	3087 (7.6)	1.1	–1.0	24.0
4/8	Германия	2534 (6.2)	0.8	1.9	57.7
5/7	Франция	2399 (5.9)	1.1	1.4	53.6
6/6	Великобритания	2376 (5.8)	0.8	3.6	62.9
7/10	Южная Корея	1873 (4.6)	1.4	2.7	29.6
<b>8/9</b>	<b>Россия</b>	<b>1734 (4.3)</b>	<b>1.7</b>	<b>8.2</b>	<b>51.2</b>
9/16	Тайвань	1414 (3.5)	1.9	–2.9	20.8
10/3	Индия	1373 (3.4)	0.9	18.2	16.9
11/12	Канада	1324 (3.3)	0.8	2.8	41.5
12/14	Италия	1287 (3.2)	0.7	4.4	55.4
13/15	Испания	1209 (3.0)	0.8	0.4	56.2
14/11	Сингапур	1127 (2.8)	3.8	7.3	63.5
15/13	Австралия	1088 (2.7)	0.8	11.4	60.3
16/5	Иран	999 (2.5)	1.8	24.9	15.2
–	Весь мир	40691 (100.0)	1	6.5	–

\* Индекс специализации ( $I_{\text{спец}}$ ) – сравнение доли статей какой-либо страны в данной области с её долей в науке в целом.  $I_{\text{спец}} > 1$  (1 – среднее значение) означает, что данная страна специализируется в указанной области.

следуют Китай и Тайвань; наибольшие же среднегодовые темпы роста (CAGR) за последние девять лет демонстрируют Иран, Индия и Китай

(см. табл. 1). Благодаря этому в нанофотонике выделяется группа азиатских стран (Индия, Иран, Китай, Сингапур, Тайвань, Южная Корея

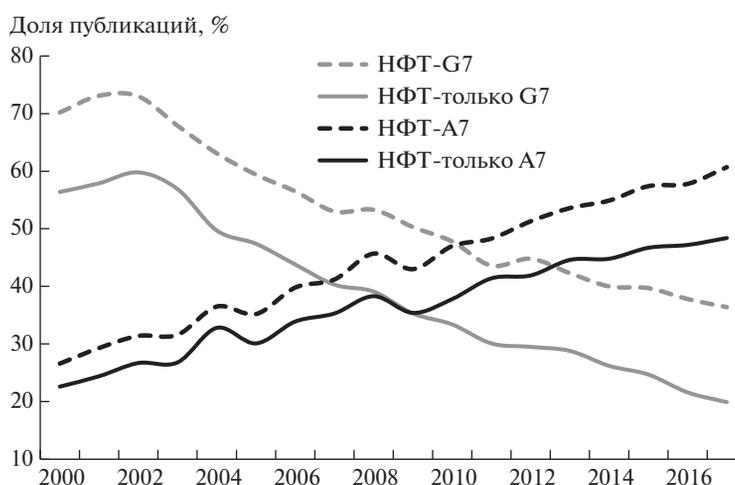
**Таблица 2.** Библиометрические показатели наиболее продуктивных в области КОИ стран (упорядочены по количеству публикаций за период 2000–2017 гг.)

Место в общем рейтинге стран: за весь период/в 2017 г.	Страна	Количество публикаций (доля в общем объёме), %	Индекс специализации	Среднегодовой темп роста (CAGR) в период 2008–2017 гг.	Доля публикаций с международным соавторством, %
1/1	Китай	12004 (25.2)	2.0	7.5	22.1
2/2	США	11 298 (23.7)	0.9	6.7	48.1
3/3	Германия	5019 (10.5)	1.4	8.7	67.4
4/4	Великобритания	4411 (9.2)	1.2	8.2	65.9
5/5	Япония	3651 (7.7)	1.1	4.3	43.4
6/6	Канада	2871 (6.0)	1.4	5.4	69.7
7/7	Италия	2838 (6.0)	1.3	5.2	55.2
8/8	Франция	2064 (4.3)	0.8	9.8	65.4
9/9	Австралия	2057 (4.3)	1.3	7.1	64.4
10/10	Испания	1762 (3.7)	1.0	13.4	72.8
<b>11/11</b>	<b>Россия</b>	<b>1558 (3.3)</b>	<b>1.3</b>	<b>12.6</b>	<b>48.1</b>
–	Весь мир	47694 (100.0)	1	6.4	–

и Япония – условно назовём эту группу стран А7), способная по объёму исследований конкурировать с развитыми странами Запада. Публикационный вклад G7 и А7 за весь период в НФТ примерно одинаков: 48 и 50% соответственно; однако группа А7 более замкнута: 83% публикаций подготовлены без внешних партнёров, тогда как в группе G7 – 69%. Динамика соперничества этих групп показана на рисунке 2, который свидетельствует, что с 2009 г. А7 перехватила лидерство. Рисунок также подтверждает, что группа G7 бо-

лее открыта к сотрудничеству с остальным миром, хотя к концу периода международная кооперация А7 стала заметно возрастать.

В КОИ ситуация несколько иная: вклад группы G7 больше (55% за весь период и 70% в его начале), отсутствует конкурирующая группа стран. Вероятно, здесь существует более высокий, чем в НФТ, научно-технический порог для исследовательской деятельности, поскольку, например, все азиатские страны из таблицы 1 имеют по КОИ

**Рис. 2.** Динамика публикационного вклада групп стран G7 и А7 в нанофотонику

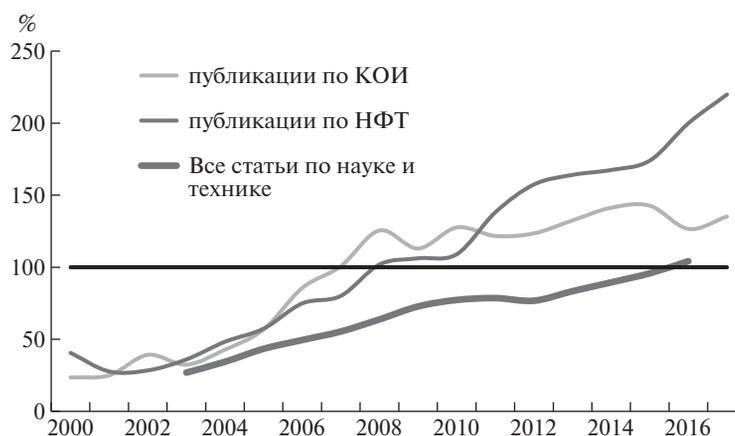


Рис. 3. Процент китайских публикаций от уровня США (данные для расчёта нижней кривой взяты из [10, Appendix table 5–27])

большую долю совместных публикаций, а рейтинговые позиции стран менее подвержены скачкообразным изменениям.

Показательно соперничество в верхнем эшелоне между Китаем и США. Из рисунка 3 видно, что КНР удалось сосредоточить усилия на двух рассматриваемых направлениях, за счёт чего по количеству публикаций по этой тематике республика обошла США на 8–9 лет раньше, чем по общему объёму научно-технических публикаций. Значительный вклад в исследования внесла Китайская академия наук (16% всех национальных публикаций по НФТ и 25% – по КОИ) – лидер среди аналогичных научных организаций мира. Важную роль в НФТ сыграла Оптическая долина Китая (ОДК), научно-исследовательской и инновационной базой которой выступает Национальная лаборатория оптоэлектроники, а также принятая в 2009 г. целевая программа по привлечению в ОДК научных талантов, в том числе из-за рубежа. Вступив в “квантовую гонку” в 2004 г., Китай в 2013 г. успешно провёл эксперимент по квантовым коммуникациям на расстоянии более 100 километров, а в августе 2016 г. запустил первый в мире спутник квантовой связи [7]. По количеству публикаций в области квантовой связи за 2000–2017 гг. Китай опередил США, однако по тематике квантовых вычислений несколько уступил им. Тем не менее в конце 2020 г. китайские учёные добились “квантового превосходства” при решении задачи отбора проб бозона с помощью фотонного квантового компьютера [8]. Такому прогрессу, очевидно, способствует обильное финансирование исследований, по объёму которого Китай превосходит другие страны [9].

В обоих направлениях у России свои исторические вехи: созданные в советские годы научные школы в области оптики и наноструктурированных материалов позволили нашим учёным с са-

мого начала успешно включиться в исследования по НФТ. Известны ранние результаты в области КОИ сотрудников Математического института им. В.А. Стеклова и Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН. Среди них можно назвать А.С. Холево – теорему Холево, позволяющую определить верхнюю границу количества классической информации, которую можно извлечь из ансамбля квантовых состояний с помощью квантовых измерений (1973); Ю.И. Манина, который в 1980 г. одним из первых предложил идею квантового компьютера; А.Ю. Китаева, разработавшего концепцию топологического квантового компьютера в 1997 г. В период 2000–2017 гг. Россия специализировалась как в исследованиях по нанопотонике, так и по квантовой обработке информации, причём в первом направлении добилась больших успехов ( $I_{\text{spec}} = 1.7$ ), чем во втором ( $I_{\text{spec}} = 1.3$ ). Соответствующим был и вклад российской науки в мировые публикационные результаты по каждому из направлений (4.3 против 3.3%) (см. табл. 1 и 2). На долю РАН приходилось 59% всех российских публикаций в области НФТ и 58% – в КОИ, то есть оба направления развивались у нас преимущественно в академическом секторе. Тем не менее в последние годы университеты обошли РАН по удельному показателю, особенно заметно – в нанопотонике. Позиции России в рейтингах стран (см. табл. 1 и 2, столбец 1) выглядят достаточно устойчиво. Более того, если пролонгировать существующие величины CAGR в НФТ (см. табл. 1, столбец 4), то к 2024 г. Россия гипотетически могла бы войти в Топ-5 стран по данному направлению (о КОИ этого сказать нельзя). Вероятно, однако, что целый ряд стран будет наращивать исследовательские усилия, тогда как в нашей стране для этого существуют препятствия. Наиболее серьёзным ограничителем конкурентных возможностей,

**Таблица 3.** Доля международных соавторских публикаций по трём направлениям

Научное направление	Доля международных соавторских публикаций, %		
	2000 г.	2017 г.	2000–2017 гг.
КОИ	25.7	34.7	31.4
НФТ	19.9	26.7	23.6
Нанотехнологии	23.1	26.8	23.5

особенно в новых высокотехнологичных областях, остаются кадровые проблемы, о которых было известно ещё в начале 2000-х годов [11], но они так и не нашли адекватного решения.

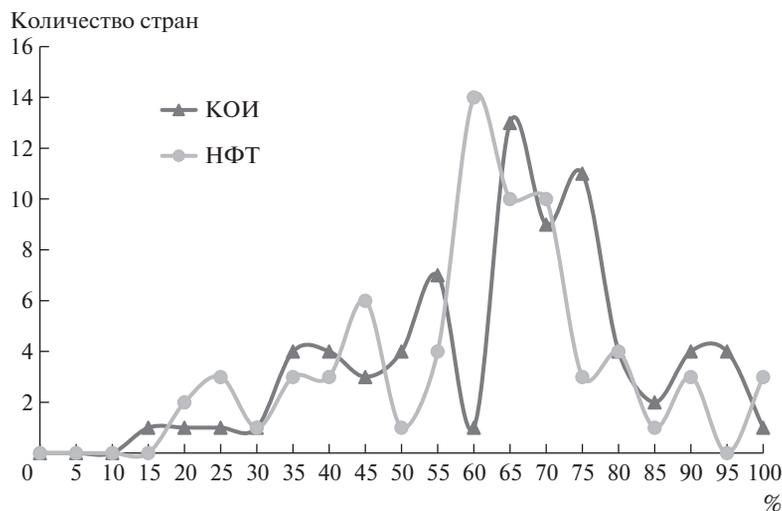
### МЕЖДУНАРОДНОЕ СОАВТОРСТВО И ЕГО СЕТЕВАЯ СТРУКТУРА

Международное научное сотрудничество привлекает всё возрастающий интерес в специальной литературе (публикации в журналах “*Scientometrics*”, “*Research Policy*”, “*Science and Public Policy*” и др., монографических работах, например, [12]), правительственных документах [13, 14], национальных дорожных картах развития НИР [15], аналитических докладах [16, 17]. В наукометрической литературе довольно продуктивным оказалось рассмотрение и анализ глобальной научной системы в форме сети международного научного сотрудничества (соавторства) [12, 18–20]. С начала 1990-х годов эта сеть стала быстро расти за счёт добавления в неё “узлов” (стран) и “рёбер” (соавторства). Если в 1990 г. в БД WoS было выявлено 172 страны, участвующих в исследованиях, и в среднем 11 связей на одну страну, то к 2013 г. их количество увеличилось до 230 и 36 соответственно [12, р. 89]. Анализ социальных сетей показал, что со временем глобальная научная сеть становится плотнее и устойчивее, что влияние внутри сети приобретает более рассредоточенный характер и возрастающее число “узлов” становится частями групп, а не спутниками крупных научных конгломератов [12, р. 89, 90].

Закономерный вопрос о соотношении глобального и национального факторов развития науки, глобальной и национальных научных систем с наукометрических позиций рассмотрен в работах [18, 19]. С помощью сетевого и факторного анализа международных соавторских связей на массивах публикаций WoS за 1990 и 2000 гг. было подтверждено, что глобальная научная сеть обладает свойством самоорганизации (отсутствует центральный орган, направляющий развитие международной науки) и по крайней мере какая-то её часть растёт независимо от национальных научных систем и в ином направлении [18]. В статье [19] сделан следующий шаг: добавив из БД WoS данные за 2011 г., авторы выполнили статистиче-

скую проверку влияния глобальной сети на национальные исследования. На основе сравнения распределений международно-соавторских и внутренних публикаций по институтским адресам с помощью расхождения Кульбака–Лейблера для 61 страны было проверено, может ли слой первых считаться предиктором для модели вторых или же имеет место обратное. В частности, показано, что для США, Китая, России международное распределение публикаций является лучшим предиктором развития науки на национальном уровне, а не наоборот, тогда как для Великобритании национальная модель оказалась более сильной [19]. На основе предложенной методологии выполнено картирование влияния глобальной научной сети, однако вследствие высокой степени агрегирования полученные выводы требуют дальнейшей проверки и уточнений на уровне стран. Например, в работе [20] с помощью оригинального подхода по-новому рассмотрена эволюция места Китая в глобальной сети, а в [21] эмпирически показано, что “исследовательский портфель” России в области углеродных наноструктур в 2000-е годы существенно отличался от мирового.

Глобальная научная сеть продолжает развиваться, и несомненный интерес представляет изучение её частей, связанных с появляющимися направлениями. Из таблицы 3 следует, что, несмотря на, казалось бы, высокую конфиденциальность исследований, доля международных соавторских публикаций в КОИ и НФТ довольно высока, причём её увеличение за 2000–2017 гг. (на 9 в КОИ и 6.8 процентных пункта в НФТ) говорит о том, что расширение фронта исследований происходило в большей степени на глобальном уровне. Более быструю интернационализацию сотрудничества в нанотехнологии, по сравнению с нанотехнологиями, из которых она родилась (см. табл. 3), вероятно, можно рассматривать как особенность складывающегося направления. Сети международного соавторства развивались весьма динамично по обоим направлениям: так, с 2000 по 2017 г. число стран-участниц исследований в области НФТ выросло с 40 до 109, тогда как число связей, приходящихся в среднем на одну страну, – с 4 до 20; рост этих показателей по КОИ составил: с 47 до 109 и с 5 до 22.



**Рис. 4.** Распределение стран с более чем 10 публикациями в нанофотонике (НФТ) и квантовой обработке информации (КОИ) по проценту публикаций с международным соавторством

Можно отметить особенности, характерные для разных стран: например, в Великобритании, Германии и США число внутренних публикаций по нанофотонике в последние годы стабилизировалось (или даже снижается), а увеличение их общего годового выпуска полностью связано с международным сотрудничеством; в Китае бурный рост публикаций происходит преимущественно за счёт внутренних исследований; в России же драйверами общего роста примерно в равной мере выступают оба фактора – внутренний и внешний. Для Великобритании, Германии, Китая и России аналогичная картина наблюдается и по направлению КОИ, однако для США роль внутреннего и международного факторов публикационного роста, в отличие от НФТ, примерно одинакова.

В случае КОИ распределение стран по доле международных соавторских публикаций сходно по форме с некоторым сдвигом в сторону больших значений (рис. 4). Сравнение распределений с учётом количества производимых странами публикаций показало: к большей международной кооперации в области КОИ склонны крупные игроки, что ещё раз говорит о наличии здесь более высокого порога для участия в исследованиях.

Из рисунка 2 следует, что общую динамику сотрудничества в области НФТ определяет наличие двух довольно замкнутых групп стран – G7 и A7. В соответствии с индексом Солтона<sup>1</sup> наиболее

<sup>1</sup> Индекс Солтона – не имеющий размерности показатель силы сотрудничества. Для пары стран он рассчитывается путём деления числа их соавторских публикаций на среднее геометрическое число всех публикаций каждого из партнёров. Впервые в библиометрической практике предложен в работе [22], впоследствии стал активно применяться при анализе сетей международного соавторства [23].

сильные соавторские связи имели следующие пары стран из таблицы 1: Китай–Сингапур (IS = 0.108), США–Китай (0.095), Германия–Россия (0.08), Франция–Италия (0.077), Великобритания–Германия (0.072), США–Германия (0.068), Великобритания–Франция (0.067), США–Италия (0.063) и Великобритания–Сингапур (0.063), причём первая, третья и четвёртая пары стран были друг для друга предпочтительными партнёрами. В четвёрку наиболее предпочтительных партнёров для России вошли ведущие западные страны: Германия, США, Великобритания и Франция, на долю которых совокупно приходится 53% международных соавторских публикаций отечественных учёных, а только на них (без третьей стороны) – 30%.

Структуру связей могут косвенно отражать и показатели цитирования. Согласно расчётам, наиболее часто российские НФТ-публикации цитируют американцы, несколько реже – китайцы. Добавим, что с 2008 по 2016 г. среднее число ссылок на одну российскую публикацию показательно выросло: для всех ссылок в 1.8 раза, тогда как для “американских” и “китайских” – в 2.6 и 3.3 раза соответственно. В структуре цитирований отечественных работ весомо представлены другие ведущие страны Запада, а в последние годы стали заметны Австралия и Сингапур. Рисунок 5 показывает большую представленность четырёх ведущих западных стран в структуре статей, цитирующих российские НФТ-публикации, нежели китайские<sup>2</sup>, причём соответствующая кри-

<sup>2</sup> В БД WOS проследить авторство цитирующей статьи значительно проще, чем авторство цитаты. Однако использование цитирующих статей вместо цитат приводит к некоторому смещению оценок, поскольку одна такая статья может содержать ссылки на несколько публикаций из оцениваемого массива.

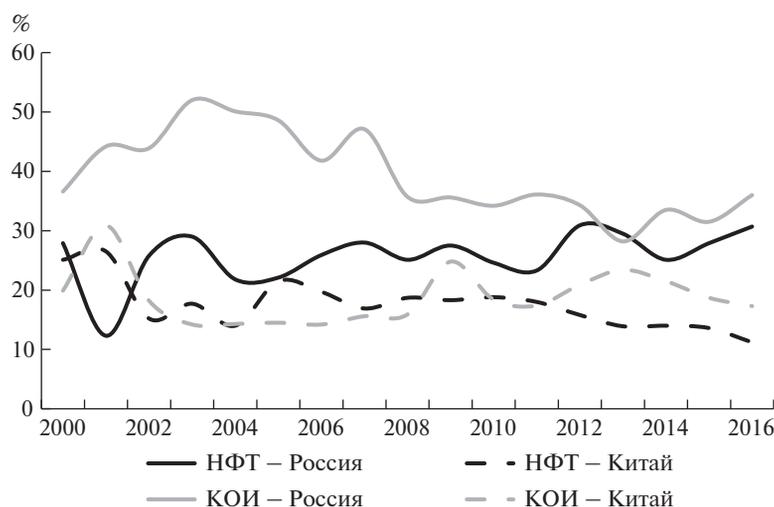


Рис. 5. Доля четырёх западных стран в структуре цитирующих статей для российских и китайских публикаций по нанофотонике (НФТ) и квантовой обработке информации (КОИ)

вая для российских публикаций имеет в последние годы повышательный тренд. Все сказанное подтверждает, что результаты российских учёных достаточно востребованы.

Проанализируем детальнее, как более интересную, сеть соавторских связей в области КОИ, ключевыми в которой выступают 46 стран, имеющих более ста публикаций<sup>3</sup>. Сеть обладает высокой плотностью — ~76%. Максимальную долю связей с другими странами, или нормированную степень центральности, равную 1, в ней имеют США, Италия и Япония. Далее, по убыванию этого показателя, следуют Германия, Великобритания и Канада (0.98), Франция и Испания (0.96) и т.д., заканчивая Марокко (0.29). Показатель России — 0.89. Нормированная степень центральности всей сети<sup>4</sup> равна 0.25, что свидетельствует о её слабой централизации<sup>5</sup>. Рассмотрим теперь силу соавторских связей стран, используя индекс Солтона. Согласно расчётам, наиболее сильные соавторские связи сложились между: Египтом и Саудовской Аравией ( $IS = 0.371$ ), Чехией и Сло-

вакией (0.187), США и Канадой (0.149), Египтом и Малайзией (0.127), Великобританией и Сингапуром (0.122), Германией и Испанией (0.119), Германией и Австрией (0.117), Германией и Великобританией (0.109), Саудовской Аравией и Марокко (0.109), Великобританией и Италией (0.105). Остальные значения  $IS$  не превышают 0.1.

Разобьём совокупность соавторских связей, согласно  $IS$ , на четыре примерно равных слоя с помощью квартилей. Обозначим по порядку:  $S_1$  — первый (или нижний, с наименьшими значениями  $IS$ ),  $S_2$  — второй,  $S_3$  — третий и  $S_4$  — четвёртый (или верхний, с наибольшими значениями  $IS$ ) квартильные слои. Первостепенный интерес представляет обнаружение групп тесно сотрудничающих стран. Проведённый анализ, в частности, показал:

- десять стран (члены G7, а также Россия, Швейцария и Швеция) образуют в  $S_4$  наибольшую клику<sup>6</sup>, то есть представляют подгруппу стран с внутренне устойчивыми соавторскими связями в области КОИ. Вхождение России в данную подгруппу (наиболее сплочённую часть сети) особенно показательным на фоне того, что экономическое сотрудничество партнёров по БРИКС пока не сопровождается заметным усилением их научной кооперации: хотя члены блока имеют соавторские связи по КОИ, они пока ещё довольно слабы (принадлежат к слою  $S_2$ ). Принадлежность российских исследователей к сильнейшей клике косвенно свидетельствует о достаточно высоком уровне отечественных исследований. Характер научных связей России подтверждает и структура цитирования её работ. Согласно рисунку 5, доля четырёх ведущих стран

<sup>3</sup> В порядке убывания количества публикаций в области КОИ: Китай, США, Германия, Великобритания, Япония, Канада, Италия, Франция, Австралия, Испания, Россия, Швейцария, Польша, Индия, Австрия, Бразилия, Сингапур, Южная Корея, Нидерланды, Израиль, Иран, Швеция, Чешская Республика, Дания, Тайвань, Бельгия, Венгрия, Финляндия, Мексика, Египет, Аргентина, Словакия, Саудовская Аравия, Турция, ЮАР, Чили, Греция, Ирландия, Украина, Португалия, Пакистан, Румыния, Новая Зеландия, Норвегия, Малайзия, Марокко.

<sup>4</sup> Структурная характеристика всей сети, которая показывает, насколько равномерно распределение степени центральности её узлов, равна 0, когда степень центральности всех узлов одинакова, и 1, когда один узел по степени центральности полностью доминирует в сети. Рассчитывается по формуле Фримана [24].

<sup>5</sup> Аналогичная сеть для НФТ имеет близкие показатели: плотность ~74%; нормированную степень центральности всей сети ~ 0.27; степень центральности у России ~0.9.

<sup>6</sup> Клика — термин теории графов. Здесь означает подмножество стран, любые две из которых имеют соавторские связи.

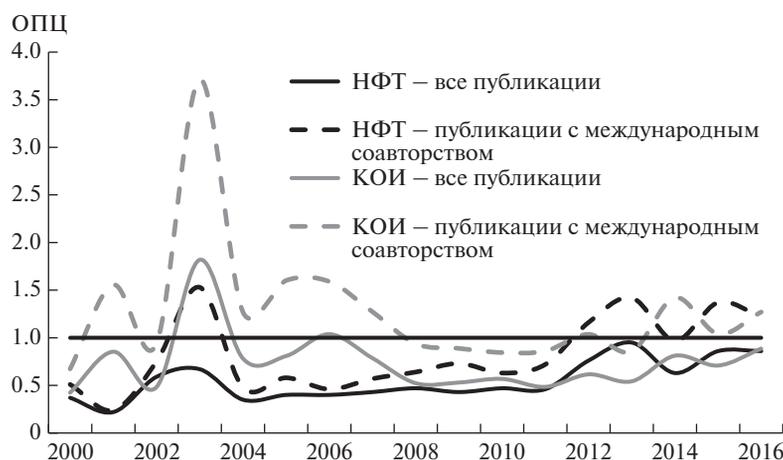


Рис. 6. Научное воздействие российских публикаций относительно среднемирового уровня (жирная горизонтальная линия)

из G7 в структуре статей, цитирующих российские публикации по КОИ, до 2011 г. существенно превышала аналогичную долю по НФТ. На 12.04.2021 г. все отобранные российские публикации были процитированы 42879 раз. Эти цитирования в 26% случаев содержались в работах американских учёных, в 19% — китайских, в 15% — немецких, в 8% — британских, в 7% — японских, в 6% — итальянских и французских, в 5% — канадских. Даже статьи с чисто российским соавторством цитировались преимущественно коллегами из стран G7 и Китая, то есть отечественные исследования по КОИ входят в сферу внимания лидеров;

- высокая плотность (90.6%) характеризует соавторские связи 19 членов ЕС. Среди них выделяется группа из 11 стран (Германия, Великобритания, Италия, Франция, Испания, Польша, Австрия, Нидерланды, Швеция, Дания, Бельгия) с сильными связями, которые на 89% принадлежат к слою  $S_4$  и на 11% —  $S_3$ . С этой группой довольно сильно связаны Чешская Республика и Венгрия, а из стран, не входящих в ЕС, — Швейцария. Слабее всего интегрированы в соавторскую подсеть стран — членов ЕС Румыния, Португалия и Ирландия;

- для азиатских стран, включая Египет, характерно преобладание более слабых внутригрупповых соавторских связей: 65% из них принадлежат к слоям  $S_1$  и  $S_2$ . По силе перекрёстной кооперации (например, с 11 выделенными странами ЕС, США и Канадой) азиатские страны можно поделить на две подгруппы: первая — Китай, Япония, Индия, Сингапур, Южная Корея, Израиль, вторая — Иран, Тайвань, Египет, Саудовская Аравия, Пакистан, Малайзия. У первой преобладают более сильные перекрёстные связи (на 85% из слоёв  $S_4$  и  $S_3$ ), у второй — более слабые (на 68% из слоёв  $S_1$  и  $S_2$ ). Наиболее тесно с западными странами сотрудничают Сингапур и Япония, наименее — Пакистан и Малайзия. Таким образом, европейские страны, за некоторым исключением, демонстрируют значительно большую внутрен-

нюю сплочённость (о чём уже говорилось выше), чем азиатские, часть из которых тяготеет к сотрудничеству с западными партнёрами;

- примеры сочетания локальных и глобальных соавторских связей в слоях  $S_4$  и  $S_3$  — латиноамериканский четырёхугольник Бразилия—Мексика—Аргентина—Чили, который входит в максимальную клику из девяти стран вместе с Испанией, США, Германией, Италией и Францией; скандинавский треугольник Швеция—Финляндия—Норвегия, который входит в крупную клику вместе с США, Германией, Испанией, Россией, Польшей и Данией. Новая Зеландия вместе со своим географическим соседом Австралией входят в максимальную клику (семь стран) слоёв  $S_4$  и  $S_3$ , которая включает также Норвегию, США, Германию, Россию и Данию. Довольно сплочённую группу (клику в  $S_4$  и  $S_3$ ) образуют четыре страны бывшего социалистического лагеря (Польша, Венгрия, Чехия и Словакия), которая входит в максимальную клику (12 стран) вместе с США, Германией, Великобританией, Японией, Францией, Швейцарией, Австрией и Данией;

- согласно индексу Солтона, наиболее предпочтительными партнёрами для России выступают Германия, США, Франция, а также Норвегия и Украина. У двух последних стран Россия в порядке партнёрских предпочтений на первом и втором местах соответственно, что может говорить о высокой обоюдной склонности к сотрудничеству.

В библиометрической литературе имеются многочисленные подтверждения положительного влияния соавторства (в том числе международного) на цитируемость публикаций [25]. Рисунок 6 демонстрирует научное влияние российских публикаций через относительный показатель цитирования (ОПС)<sup>7</sup>. Из сопоставления графиков

<sup>7</sup> ОПС показывает выше или ниже среднемирового уровня (=1.0) цитируются публикации данной страны.

следует, что отечественные публикации по КОИ (за небольшим исключением) имеют бóльший научный эффект, чем публикации по НФТ; международное соавторство в обоих случаях вносит заметный вклад в цитируемость на уровне отдельной публикации, приближая её к среднемировому показателю в последние годы.

При подсчёте цитат в пятилетнем окне установлено: международное соавторство повышает цитируемость отечественных работ по КОИ в среднем в 3.5, а по НФТ – в 2.9 раза. Аналогичные показатели составляют: для Китая – 2.2 (2.0), Германии – в 1.5 (1.4), США – в 1.3 (1.1) раза. Таким образом, международное соавторство в той или иной степени выгодно всем странам, причём для КОИ преимуществ оказывается больше. Последнее может означать, что важные научные события по этому направлению с большей вероятностью происходят на глобальном уровне.

Кратко подытожим:

- за рассматриваемый период как по квантовой обработке информации, так и по нанофотонике исследовательская активность в большей мере проявлялась на глобальном уровне: свыше трети мировых публикаций по КОИ и четверти по НФТ в 2017 г. принадлежали международным соавторским коллективам; доля соавторских работ для стран с количеством от 10 статей имела диапазон концентрации 65–75% по КОИ и 60–70% по НФТ, причём по первому направлению к кооперации оказались более склонны крупные игроки, чем по второму;

- расширение сетей международного соавторства происходило весьма динамично: по КОИ, например, число стран-участниц исследований увеличилось за 2000–2017 гг. в 2.3 раза, а число соавторских связей в среднем на одну страну – в 4.4 раза. Структуру соавторской сети 46 значимых игроков по этому направлению характеризуют: высокая плотность и небольшая степень централизации; наличие ядра особенно тесно связанных между собой стран Европы и Северной Америки; сочетание локальных и глобальных соавторских связей (латиноамериканский четырёхугольник и скандинавский треугольник); значительно бóльшая сплочённость европейских стран по сравнению с азиатскими, часть из которых сильнее тяготеет к сотрудничеству с западными партнёрами;

- Россия вместе с членами G7, Швейцарией и Швецией входит в наиболее сплочённое ядро сети, имея в качестве предпочтительных партнёров Германию, США и Францию. Западные коллеги обеспечивают и бóльшую часть ссылок на отечественные КОИ- и НФТ-публикации, что ещё раз подчёркивает интегрированность российских исследований в мировые. Участие в международной кооперации заметно увеличивает цитируемость российских работ, повышая их глобальную видимость;

- сказанное в отношении КОИ в значительной мере относится и к НФТ; наиболее заметное отличие нанофотоники – в существовании двух конкурентных по объёмам исследований блоков стран – условно Запада и Востока, которое она унаследовала от нанотехнологий [26].

Выполненный анализ с применением библиометрических и сетевых методов позволяет сделать ряд выводов.

1. Оба направления – КОИ и НФТ – развиваются динамично, но без признаков бума, характерного, например, для графена. Если судить по доле публикаций в таких престижных изданиях, как журналы серии “*Nature*”, а также “*Science*” и “*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*” (3.8% в КОИ и 1.2% в НФТ по сравнению с 1.4% для графена), они в фокусе внимания мирового научного сообщества. Это подтверждает и состав ведущих участников исследований, среди которых страны – члены G7 и лидирующий в обоих направлениях Китай. После 2009 г. определяющую роль в формировании исследовательского ландшафта в НФТ стала играть группа азиатских стран. По КОИ семь последующих мест за Китаем занимают представители группы G7, причём отставание США от Китая заметно меньше, чем по НФТ.

2. За последние годы Китай создал десятки университетов мирового класса по западному образцу, осуществил массивную подготовку научных кадров, в том числе путём отправки студенческой молодёжи для обучения за рубежом, а позже реализовал масштабный план по возвращению отечественных и привлечению иностранных научных талантов в страну [27]. Довольно эффективной оказалась, например, высоко селективная “программа 3551 талант Оптической долины”, направленная на привлечение мировых лидеров и молодых исследователей для работы в ряде областей по профилю Оптической долины Китая. Эти меры, наряду с усиленным финансированием науки, позволили КНР выиграть научное соревнование по ряду прорывных направлений, включая КОИ, НФТ, нанотехнологии и т.д., создав тем самым прочный научно-технологический задел на будущее. Эта ситуация очень показательна.

3. В последние десятилетия всё бóльшая часть научных исследований в мире осуществляется на основе международной кооперации, причём в таких передовых направлениях, как КОИ и НФТ, эта тенденция особенно заметна. Всё новые страны включаются в исследования, формируются двух- и многосторонние международные команды учёных, на долю которых в 2017 г. пришлось почти 35% всех публикаций в области КОИ. Ведущие мировые университеты и НИИ – Калифорнийский и Гарвардский университеты, Массачусетский технологический институт (США), Научно-технический университет, Университет

Цинхуа, Джэцзянский университет (Китай), Оксфордский, Кембриджский, Саутгемптонский университеты (Великобритания), МГУ, ФИАН, Университет ИТМО (Россия) и др. – стали активными участниками международного сотрудничества. Для сформировавшейся соавторской сети в области КОИ характерно наличие сплочённого ядра стран, включающего членов группы G7, Швейцарию, Швецию и Россию; из азиатских стран к ним ближе всего примыкает Сингапур. Центром притяжения G7 выступает и в соавторской сети по НФТ. Так, представители стран группы A7 имеют с коллегами из группы G7 в 3.4 раза больше соавторских связей, чем друг с другом; для остального мира (без G7 и A7) соответствующее соотношение равно 2.4. В то же время, A7 и остальной мир связаны друг с другом намного слабее, чем с группой G7. Отсюда, в частности, следует, что промышленно развитые западные страны, обладая мощной системой исследовательских университетов, остаются главным драйвером научной глобализации.

4. По КОИ Россия входит в упомянутое ядро, а в области НФТ наиболее тесно связана с четвёркой ведущих западных стран. Учитывая слабость наших научных связей с партнёрами по БРИКС, можно сказать, что интеграция отечественной науки в мировую продолжается в основном за счёт западного направления. Этому способствуют не только исторические традиции, но и тот факт, что Запад – преимущественное место притяжения российской научной диаспоры. С 2006 г. у нас началась модернизация вузовской системы (создание и поддержка исследовательских университетов, перенос в них центра тяжести фундаментальных исследований), предпринята попытка реинтеграции научной диаспоры, привлечения в страну известных зарубежных учёных (программа мегагрантов). Однако исторические условия для реформирования научно-образовательной систем у нас и в Китае сложились по-разному. В России реформирование началось после кадрового опустошения науки в 1990-е годы, сопровождавшегося негативными демографическими процессами [11]. Новый виток политизации мировой науки стал раскручиваться с 2016 г. (с приходом к власти в США Д. Трампа), когда с момента начала реформ в Китае прошло более 35 лет, а в России только 10. Всё перечисленное существенно ограничивает возможности нашей страны. Нарастивая публикационный вклад и долю международно-соавторских статей, Россия досрочно превзошла в КОИ и НФТ установленные задания по этим показателям: 2.44% и 29.6% соответственно. Однако для вхождения в топ-5 стран по КОИ первый показатель в 2017 г. должен был равняться 6.7%, а не 3.8%. Кадровый дефицит в сочетании с политически мотивированными ограничениями международного сотрудниче-

ства может стать для нас основным препятствием в достижении поставленной цели. С 2014 по 2020 г. доля международно-соавторских публикаций России выросла примерно с 35 до 41%, а с четвёркой ведущих стран Запада – с 21 до 22%. Некоторое снижение показателя отмечалось только в кооперации с четырьмя западными странами без участия третьей стороны – с 10.3 до 8.7%.

Можно заключить, что глобальная научная сеть объективно существует и положительно влияет на развитие и качество исследований, разработку прорывных направлений. Она способствует развитию национальных научных систем, подготовке высококвалифицированных кадров. Но есть и обратная сторона медали: глобальная повестка навязывается в ущерб решению насущных внутренних проблем (что особенно характерно для социогуманитарных наук), продолжается утечка идей, умов и инвестиций. А значит, требуется взвешенный подход к взаимодействию национальной и глобальной научных систем, которое должно порождать синергетический эффект – Китай сумел его добиться в полной мере [27].

В последние годы вслед за ростом международной напряжённости, особенно в отношениях между США и Китаем, заметно усилилась политизация науки, запускающая процессы деглобализации. Так, в начале 2020 г. китайские власти анонсировали введение новой национально ориентированной системы оценки научных исследований, предусматривающей отказ от использования индексов научного цитирования от Clarivate Analytics [28]. Даже если в других странах всё останется по-прежнему, этот шаг Китая может вызвать заметное сокращение международного сотрудничества, хотя бы потому, что в последние годы именно учёные США и Китая подготовили самое большое число совместных публикаций (в БД SCIE 46.5 тыс. в 2017 г. и 61.1 тыс. в 2020 г.). Однако пока никаких обвалов не наблюдается: Китай и США по-прежнему остаются предпочтительными партнёрами друг для друга; индекс Солтона у них достаточно высок и колеблется незначительно.

А что же Россия? Перенеся фокус с академического сектора на университетский, мы не прошли того реформаторского пути, который проделал Китай за несколько благоприятных десятилетий. Учитывая длительное недофинансирование отечественной науки и кадровый кризис, нам не под силу делать ставку на автономизацию исследований без риска оказаться на обочине, особенно в высокотехнологических областях. Успешное восприятие передового научного знания [29], активный вклад в определение международной научной повестки [14] невозможны без участия в совместных исследованиях, развивающихся на переднем крае науки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Future Directions of Quantum Information Processing / A Workshop on the Emerging Science and Technology of Quantum Computers, Communication, and Measurement. US, Virginia, 2017.  
[https://basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Future\\_Directions\\_Quantum.pdf?ver=2017-09-20-003031-450](https://basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Future_Directions_Quantum.pdf?ver=2017-09-20-003031-450) (дата обращения 05.05.2021).
2. Quantum Information Science. An Emerging Field of Interdisciplinary Research and Education in Science and Engineering / Report of the NSF Workshop. US, Virginia, 1999.  
<https://www.nsf.gov/pubs/2000/nsf00101/nsf00101.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
3. Editorial. The hidden face of nanophotonics // Nature Photonics. 2011. V. 5. № 7. P. 379.
4. Nanophotonics: Accessibility and Applicability. Chapter 4: Potential military applications of nanophotonics. 2008. <https://www.nap.edu/read/11907/chapter/6> (дата обращения 05.05.2021).
5. Указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016 г. “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”.  
<http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
6. Постановление Правительства РФ № 377 от 29.03.2019 г. Государственная программа “Научно-технологическое развитие Российской Федерации”.  
<http://static.government.ru/media/files/AAVpU2sDAVMQkIHV20ZJZc3MDqctxt8x.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
7. *Herman A.* Winning the race in quantum computing // American Affairs. 2018. № 2. P. 96–113.
8. *Zhong H., Wang H., Deng Y., Chen M. et al.* Quantum computational advantage using photons // Science. 2020. V. 370. № 6523. P. 1460–1463.
9. *Erwin S.* Pentagon sees quantum computing as key weapon for war in space. July 15, 2018.  
<https://spacenews.com/pentagon-sees-quantum-computing-as-key-weapon-for-war-in-space/> (дата обращения 05.05.2021).
10. National Science Board. Science and Engineering Indicators 2018. Arlington, VA: National Science Foundation, 2018.
11. *Терехов А.И.* Научные кадры – непреходящая ценность // Вестник РАН. 2002. № 7. С. 582–587.
12. *Wagner C.S.* The Collaborative Era in Science. London: Palgrave Macmillan, 2018.  
<https://www.palgrave.com/gp/book/9783319949857> (дата обращения 10.03.2021).
13. *Балякин А.А., Задорина А.К., Куклина И.Р. и др.* Позитивирование международного научно-технического сотрудничества в правовых документах стран–участников научной глобализации // Вестник РУДН. Серия: Социология. 2018. Т. 18. № 4. С. 651–667.
14. *Дёжина И.Г., Ключарёв Г.А.* Российские концепции международного научно-технического сотрудничества: смена драйверов развития // Социология науки и технологий. 2020. № 4. С. 51–68.
15. UK Research and Development Roadmap. London: HM Government, July 2020.  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/896799/UK\\_Research\\_and\\_Development\\_Roadmap.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/896799/UK_Research_and_Development_Roadmap.pdf) (дата обращения 05.05.2021).
16. China's International Scientific Research Collaboration. China, Beijing: National Center for S&T Evaluation and Clarivate Analytics, 2020.  
<http://www.ncste.org/uploads/www/201712/200927279unk.pdf> (дата обращения 05.05.2021).
17. International Cooperation in Science, Technology and Innovation: Strategies for a Changing World. Report of the Expert Group established to support the further development of an EU international STI cooperation strategy. Brussels: European Commission, 2012.  
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/60358f36-aafe-4537-8567-32e8597ab350> (дата обращения 05.05.2021).
18. *Wagner C.S., Leydesdorff L.* Mapping the network of global science: comparing international co-authorships from 1990 to 2000 // International Journal of Technology and Globalisation. 2005. V. 1. № 2. P. 185–208.
19. *Wagner C.S., Park H.W., Leydesdorff L.* The continuing growth of global cooperation networks in research: A conundrum for national governments // PLOS ONE. 2015. V. 10. № 7. P. 1–15. e0131816.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131816>
20. *Zhang Z., Rollins J.E., Lipitakis E.* China's emerging centrality in the contemporary international scientific collaboration network // Scientometrics. 2018. V. 116. P. 1075–1091.  
<https://doi.org/10.1007/s11192-018-2788-5>
21. *Терехов А.И.* Углеродные наноструктуры: метрический анализ, 2000–2015 (Ч. 2) // Библиосфера. 2018. № 1. С. 57–65.
22. *Luukkonen T., Tijssen R.J.W., Persson O., Sivertsen G.* The measurement of international scientific collaboration // Scientometrics. 1993. V. 28. № 1. P. 15–36.
23. *Glanzel W.* National characteristics in international scientific cooperation // Scientometrics. 2001. V. 51. № 1. P. 69–115.
24. *Freeman L.C.* Centrality in social networks conceptual clarification // Social Networks. 1979. V. 1. № 3. P. 215–239.
25. *Adams J., Gurney K.A.* The Implications of International Research Collaboration for UK Universities. London: Digital Science, 2016. [file:///C:/Users/Allex/Downloads/Digital\\_Research\\_Report\\_Collaboration.pdf](file:///C:/Users/Allex/Downloads/Digital_Research_Report_Collaboration.pdf) (дата обращения 16.05.2021).
26. *Терехов А.И.* Место России в меняющемся нанотехнологическом ландшафте // Международные процессы. 2017. Т. 15. № 1. С. 79–91.
27. *Marginson S.* National/global synergy in the development of higher education and science in China since 1978 // Frontiers of Education in China. 2018. V. 13. № 4. P. 486–512.  
<https://doi.org/10.1007/s11516-018-0027-8>
28. *Futao Huang.* China is choosing its own path on academic evaluation. 26 February 2020.  
<https://www.universityworldnews.com/post.php?story=20200226122508451> (дата обращения 16.05.2021).
29. *Куракова Н.Г., Петров А.Н., Зинов В.Г.* Подходы к актуализации научно-технологической политики России в ответ на новые вызовы // Экономика науки. 2020. № 3. С. 138–151.  
<https://doi.org/10.22394/2410-132X2020-6-3-138-151>