

А.И. ТЕРЕХОВ,Центральный экономико-математический институт РАН
(Москва, Российская Федерация; e-mail: alex.i.terekhov@gmail.com)

О РАЗВИТИИ НАУЧНОЙ БАЗЫ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК: 001

<https://doi.org/10.22394/2410-132X-2022-8-1-58-72>

Аннотация: Цель статьи – изучить развитие исследований в области квантовых технологий, опираясь на библиометрический анализ публикаций, проиндексированных в БД Web of Science Core Collection с 1990 по 2020 г. Рассмотрен глобальный выход публикаций, продуктивность отдельных стран и организаций, показатели международной научной кооперации. Выявлены характерные для области черты мировых исследований: высокая концентрация в группе лидеров, заметное участие корпораций и военно-научных структур, растущая международная кооперация. Значительное внимание уделено позициям России, которая к концу периода вернулась в первую десятку стран по продуктивности. Российская академия наук – шестая среди научных организаций мира по производству публикаций в области квантовых технологий за весь период; отечественные ученые активно сотрудничают с зарубежными, в том числе из ведущих западных стран. Для внутреннего ландшафта характерно существенное преобладание «центра», где находятся ведущие НИИ и университеты страны, и пока еще малый исследовательский вклад российского коммерческого сектора.

Ключевые слова: квантовые технологии, квантовая обработка информации, научная публикация, база данных, библиометрический анализ

Для цитирования: Терехов А.И. О развитии научной базы квантовых технологий. *Экономика науки*. 2022; 8(1):58-72. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2022-8-1-58-72>



ВВЕДЕНИЕ

Слово «информация», пожалуй, один из наиболее емких символов нашего времени. В научном понимании любая информация на фундаментальном уровне имеет квантовую природу, а квантовые компьютеры, каналы связи и датчики представляют собой те устройства, которые способны достигать конечных пределов ее обработки. История зарождения квантовой обработки информации (КОИ) – междисциплинарной области, изучающей, как информация собирается, преобразуется и передается на квантовом уровне, – многократно излагалась (например, [1, 2]). Теоретические возможности квантового компьютера стали обсуждаться с начала 1980-х гг. Идею квантового компьютера как способа эффективно моделировать квантово-механические системы в 1982 г. высказал американский физик Р. Фейнман, хотя были и более ранние работы [1, 2]. Следующий шаг сделал британский физик Д. Дойч, который в 1985 г. предложил общие рамки для квантовых вычислений, описал, как будет выглядеть квантовый алгоритм, и предположил технологическую возможность создания квантовых компьютеров в будущем. Долгое время эти идеи оставались практически не востребуемыми, пока американский математик П. Шор в 1994 г. не показал, что разложение целого числа на простые множители может быть эффективно выполнено на квантовом компьютере, а индо-американский математик Л. Гровер в 1995 г. – что квантовый компьютер способен ускорить проведение поиска в неструктурированном поисковом пространстве [1]. Именно эти два практических применения, в особенности первое, имеющее отношение к взлому криптографических

кодов, стимулировали взрывной интерес к КОИ. В [1] отмечен значимый вклад отечественных ученых в развитие этой области: математика Ю.И. Манина (один из первых предложил идею квантового компьютера в 1980 г.); математика А.С. Холево («теорема Холево», дающая верхнюю границу количества классической информации, которую можно извлечь из ансамбля квантовых состояний с помощью квантовых измерений; опубликована в 1973 г.); физика А.Ю. Китаева (в 1997 г. предложил концепцию топологического квантового компьютера). Позднее в своем эссе М. Нильсен назвал концепцию Китаева одной из самых радикальных новых идей в физике за последние сто лет [3].

К началу 2000-х гг. идея квантового компьютера стала обретать черты практической достижимости (см., например, [4]), а разработка все новых квантовых алгоритмов [5] сместила центр внимания квантовых вычислений на борьбу за «квантовое превосходство» (когда возможности квантового компьютера превзойдут возможности любого классического) для стимулирования новых достижений в разных областях: от материаловедения, химии, фармацевтики до кибербезопасности, искусственного интеллекта, перспективного производства, оптимизации трафика, банковского дела, оборонной сферы и т. д. [6–8].

Многообещающие рыночные возможности, как и серьезное влияние КОИ на вопросы безопасности, побудили правительства стран по всему миру к выработке национальной политики или стратегий поддержки исследований и разработок в этой области (см. обзор [9]). К началу 2000-х гг. относятся первые крупные госинвестиции в центры квантовых исследований, а одной из первых скоординированных национальных квантовых стратегий была Национальная программа Великобритании по квантовым технологиям, принятая в 2013 г. К настоящему моменту, по оценке [9], 17 стран имеют скоординированные национальные квантовые стратегии (еще 3 готовят их), 12 – значимые правительственные инициативы, 14 – участвуют в международных квантовых партнерствах. Наибольшие инвестиции в КОИ предполагает сделать Китай

(~15 млрд долларов в течении 5 лет), бюджет Национальной квантовой инициативы США составляет ~ 1.3 млрд долларов [9]. КОИ находится в центре внимания российского правительства: создан Российский квантовый центр (2011 г.); утверждена дорожная карта квантовых технологий с пятилетним бюджетом 51.1 млрд рублей (2019 г.), создана Национальная квантовая лаборатория (2020 г.) и т. д. Как отмечено в [10], интенсивный глобальный интерес, внутренние знания и опыт, существенная финансовая поддержка правительства и промышленности создают предпосылки для заметного роста квантовой науки и технологий в стране в предстоящие пять лет.

Поскольку КОИ относительно небольшая область, не требующая масштабных капитальных затрат, сопоставление инвестиционных показателей мало о чем говорит. Высокая наукоемкость и тот факт, что только путем дальнейших исследований можно разрешить все еще значительные неопределенности технологического и рыночного характера, подчеркивают необходимость внимания к формированию и развитию научной базы КОИ. Полезным инструментом могла бы стать библиометрия, занимающаяся количественным анализом развития науки и ее областей на основе публикаций. Такая работа начата в последние годы серией публикаций [11–21], которые отличаются по: а) *широте охвата проблематики квантовых технологий*: КОИ в целом [14–18], квантовые вычисления [11, 12, 19], квантовая криптография [20], квантовое машинное обучение [21]; б) *используемым источникам информации*: Web of Science [12–18], Scopus [11, 19–21]; в) *степени проработки поискового запроса*: без детализации (с использованием небольшого числа или единственного поискового термина общего характера) [11–12, 20–21], с детализацией (более глубокой разработкой стратегии поиска и широким набором поисковых терминов) [14–19]. Несколько особняком стоит работа [13], где квантовые технологии идентифицируются с помощью максимально широкого поискового термина «quantum*». Упомянутые публикации отличают также разные временные рамки исследования и используемый библиометрический инструментарий.

В настоящей статье внесены улучшения в методы поиска, направленные на более широкий охват и углубленную детализацию основных тематик КОИ. Это позволит уточнить некоторые из библиометрических оценок, полнее отразить «картину» развивающихся исследований в области.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Как отдельная широко признанная область научных исследований КОИ возникла в начале 1990-х гг. Сообразуясь с этим и важностью отражения новых трендов, настоящий анализ охватывает период 1990–2020 гг. Источником информации для него послужили две базы данных из Web of Science Core Collection (WoS_CC): Science Citation Index Expanded (БД SCIE) и Conference Proceedings Citation Index – Science (БД CPCI-S); использование других БД из этой коллекции (как, например, в [13, 15, 17, 18]) в настоящей работе сочтено нецелесообразным. Ввиду пока еще слабой структуризации рассматриваемой области построение стратегии поиска играет важную роль. В предшествующих работах для целей поиска использовались, как правило, наборы поисковых терминов разной степени полноты и точности. В работах автора [14, 16] для формирования исходной выборки был применен комбинированный подход, сочетающий сплошной отбор публикаций в тематических журналах WoS_CC («*Quantum Information & Computation*», «*Quantum Information Processing*», «*International Journal of Quantum Information*», «*npj Quantum Information*») с поиском по 85 ключевым терминам в остальных. В настоящей статье поиск осуществлялся только по ключевым терминам, в том числе и потому, что указанные журналы в 1990–2000 гг. не выходили. Первоначальный список поисковых терминов был сформирован на основе авторских и добавленных ключевых слов в публикациях из 4-х тематических журналов; затем он подвергся ряду экспертных дополнений и корректировок. Например, стремясь ограничить попадание в выборку нерелевантных публикаций, мы решили не включать в запрос такие важные для КОИ, но достаточно общие термины, как «quantum entanglement»,

«quantum superposition»¹ и др. В итоге построенный поисковый запрос по тематике КОИ включал более 240 ключевых терминов, которые охватывали:

– **квантовые компьютеры и вычисления:** а) “quantum hardware” (qubit*², “quantum gate*”, “quantum register*”, “quantum bus”, “quantum chip*”, “quantum circuit*”, “quantum integrate circuit*”, “quantum memor*”, “quantum RAM”, “quantum processor*”, “quantum device*”, “quantum comput*”, “quantum-mechanical comput*”, “quantum parallel comput*”, “quantum (NISQ) computer*”, “quantum* supercomput*”, “quantum server*” и др.); б) “quantum software” (“quantum language*”, “quantum program*”, “quantum algorithm*”, “quantum-inspired algorithm*”, “quantum annealing”, “quantum optimization”, “Grover’s search algorithm*”, “quantum eigensolver*”, “quantum machine learning”, “quantum random walk*”, “quantum game*” и др.);

– **квантовую связь и криптографию:** “quantum information”, “quantum Fisher information”, “quantum mutual information”, “Holevo bound*”, “quantum communication*”, “quantum channel*”, “quantum network*”, “quantum transmission*”, “quantum teleportation”, “quantum coding”, “quantum encoder*”, “quantum decoder*”, “quantum error correct*”, “quantum cryptograph*”, “quantum key distribution”, “BB84 protocol”, “quantum bit commitment”, “quantum secret sharing”, “quantum signature*”, “quantum fingerprint*”, “quantum coin toss*”, “quantum random number generator*”, “quantum oracle”, “quantum repeater*”, “quantum authentication”, “quantum encryption*”, “quantum attack*”, “quantum code breaking”, “quantum resistant encryption” и др.;

– **квантовую метрологию и зондирование:** “quantum metrology”, “quantum precision measurement*”, “quantum sens*”, “quantum detect*”, “quantum magnetometer*”, “quantum gyroscope*”, “quantum accelerometer*”, “quantum* radar*” и др.

Для оценки «мощности» запроса был выполнен ряд тестовых сравнений. Так, при

¹ Постфактум отметим, что построенным запросом были охвачены 53% случаев встречаемости в базах данных первого из названных терминов и 41% – второго.

² * здесь означает усечение термина.

одинаковых параметрах выборки он позволил выявить на 22% больше публикаций, чем в [15, 17], на 12% – чем в [18] и на 1.5% – чем в [16]. С его помощью из БД SCIE и CPCI-S совокупно (поиск проводился в названиях, аннотациях и ключевых словах) за период 1990–2020 гг. было извлечено 80962 публикации (типа: *article, review, proceedings paper, letter*), которые послужили исходной выборкой для настоящего анализа. Далее приведены его основные результаты.

ПУБЛИКАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РОСТА ОБЛАСТИ

Выделим условно всю совокупность «квантовых» публикаций двумя поисковыми терминами: «quant» и «quantum», тогда доля работ по тематике КОИ в период 1990–2020 гг., согласно нашему запросу, составляет в ней около 11%. *Рисунок 1* показывает динамику интереса ученых, изучающих квантовый мир (профильных ученых), в целом и по ряду стран. Можно видеть, что глобальное сообщество профильных ученых уделяло КОИ все возрастающее внимание, за исключением небольшого промежутка 2008–2012 гг. Длительный «спурт» Китая привел его к лидерству по доле

КОИ в общем количестве «квантовых» публикаций, которая в 2008 г. превысила 21%. Однако затем, видимо, перегревшись (или перейдя в режим закрытости), этот интерес заметно снизился и установился в районе 15%-ой доли публикаций. У США после длительной паузы стабильности (2003–2012 гг.) долевой вклад КОИ-публикаций вновь возобновил экспоненциальный рост, обогнав в 2014 г. общемировой тренд. Практически устойчивый рост соответствующего показателя у Германии, долгое время уступавший общемировому тренду, позволил выйти стране на его траекторию. Россия, занимающая по количеству «квантовых» публикаций 6-е место в мире, значительно уступает ему в интересе профильных ученых к проблематике КОИ, хотя в последние годы этот интерес стал заметно повышаться.

Согласно *рисунку 2*, с 1990 по 2011 г. имел место логистический рост глобального производства КОИ-публикаций с выходом на короткое «плато» к 2009 г. Уже с 2011 г. благодаря новым технологическим достижениям (так, в 2011 г. канадская компания «D-Wave Systems Inc.» анонсировала первый коммерчески доступный квантовый компьютер, а в 2012 г. физики создали одноатомный

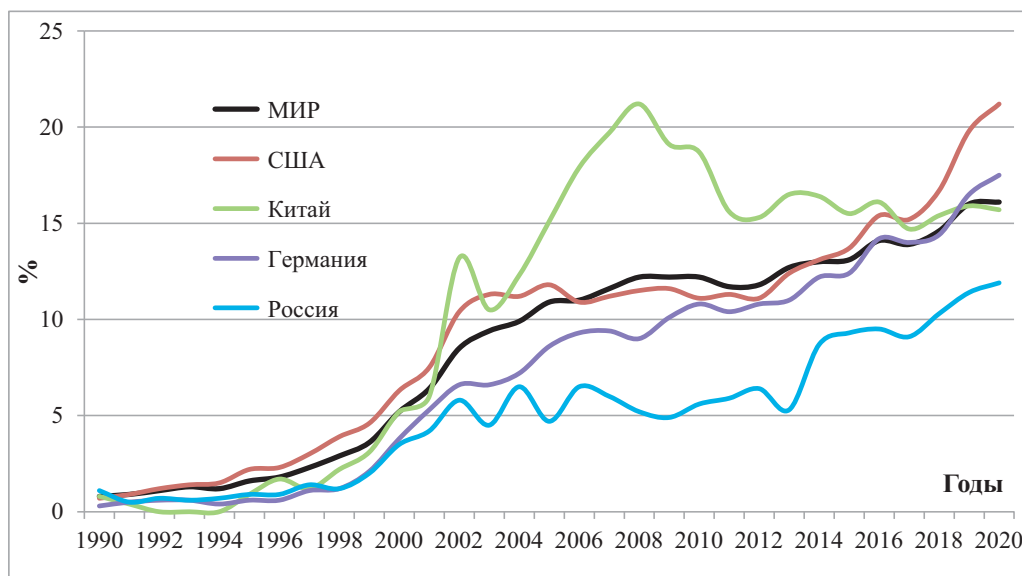


Рисунок 1. Доля публикаций по тематике КОИ в общем количестве «квантовых» публикаций: изменение по годам

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

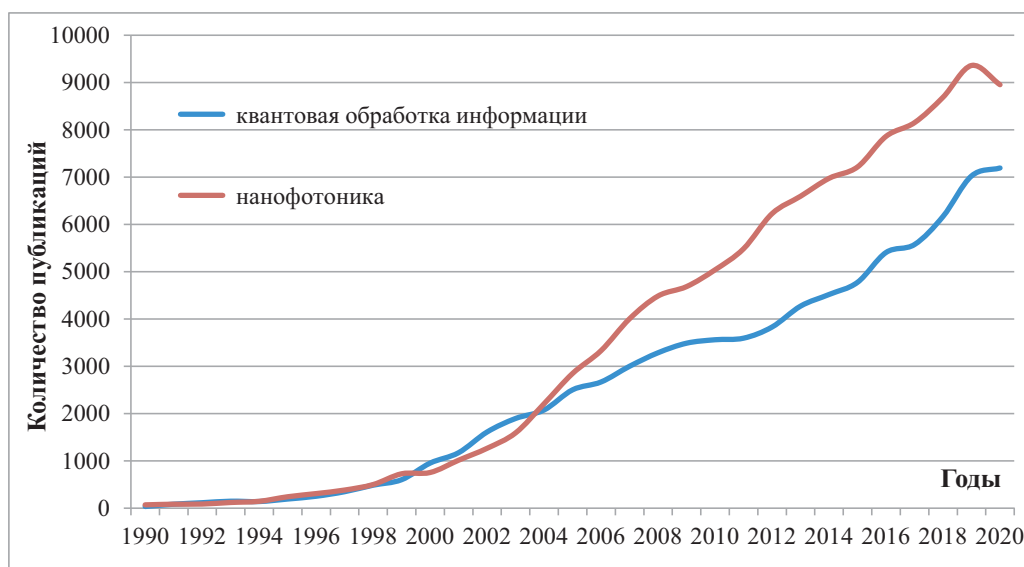


Рисунок 2. Динамика мирового выхода публикаций в области КВИ и нанопотоники

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

транзистор), серьезному увеличению финансирования (по оценке [22], достигло к 2021 г. почти 25 млрд долларов) он опять перешел на экспоненциальную траекторию. Тем не менее этот рост все же уступал росту в другой появляющейся высокотехнологичной области — нанопотонике (рисунок 2), хотя здесь могла сыграть роль и большая степень закрытости исследований по КВИ.

ОСНОВНЫЕ УЧАСТНИКИ МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (СТРАНЫ И ОРГАНИЗАЦИИ)

В исследованиях за весь период хотя бы минимально участвовали более 120 стран, 25 из которых можно отнести к значимым участникам: публикационный вклад каждой превысил 1%. Десять наиболее продуктивных стран представлены на рисунке 3. Показательно, что в их числе все промышленно развитые члены группы G7. Начиная с 1996 г., совокупный доленой вклад первой десятки стран в мировые публикации по КВИ лишь слегка колебался вокруг 80%, тогда как вклад двух лидеров (США и Китая) между 2004 и 2020 гг. заметно увеличился: с 40 до 53%. Этот рост, очевидно, подстегивало соперничество двух стран между собой. На рисунке 4 показана его динамика. Стартовав

с 6-го в 2000 г., уже в 2008 г. Китай вышел на 1-е место, не уступив его в дальнейшем США. Вообще, с 2008 г. в лидирующей тройке установился статус-кво: 1-е место у Китая, 2-е — у США, 3-е — у Германии. Россия, занимая в 2000 г. 7-е место, в условиях острого соперничества стран опустилась к 2020 г. на 10-е. Тем не менее с 310 публикациями в этом году она заметно опередила Испанию (246 публикаций) и вплотную приблизилась к Франции (325). Сначала рывками, а затем последовательно к своему успеху шла Индия (рисунок 4).

На рисунке 5 представлена первая десятка академических, правительственных и университетских организаций мира, внесших наибольший вклад в исследования по КВИ. О значительных коммерческих ожиданиях говорит также участие в исследованиях крупных корпораций и компаний, в число которых входят, например, «Nippon Telegraph Telephone Corporation» (Япония; 622 публикации); «International Business Machines IBM» (США; 615); «Microsoft Corporation» (США; 296); «Toshiba Corporation» (Япония; 259); «Hewlett-Packard» (США; 240); «Nippon Electric Corporation» (Япония; 259); «Google Inc.» (США; 165); «AT&T Inc.» (США; 164); «Raytheon Technologies Corporation» (США; 116); «Intel Corporation»

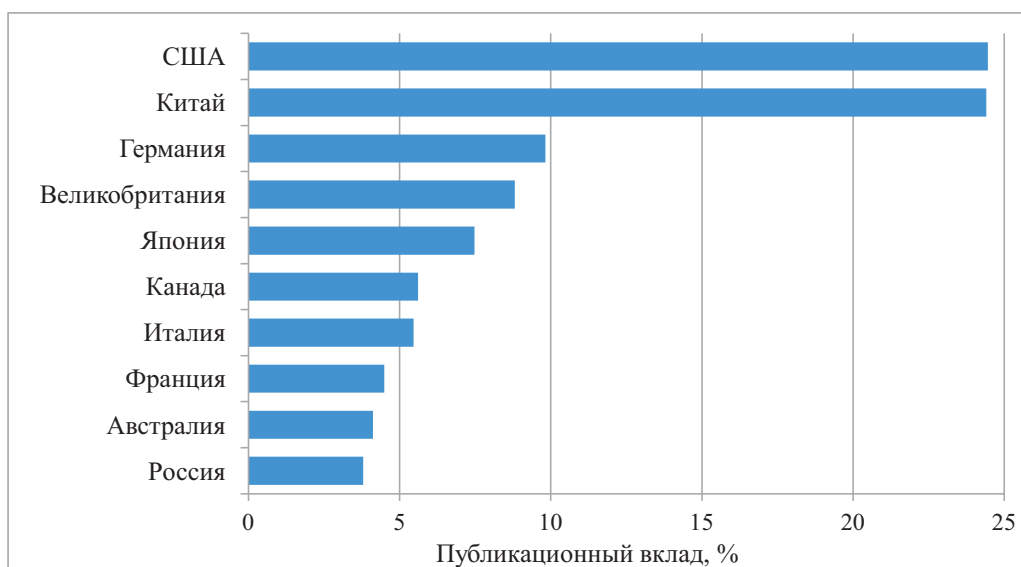


Рисунок 3. Публикационный вклад первой десятки стран, 1990–2020 гг.

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

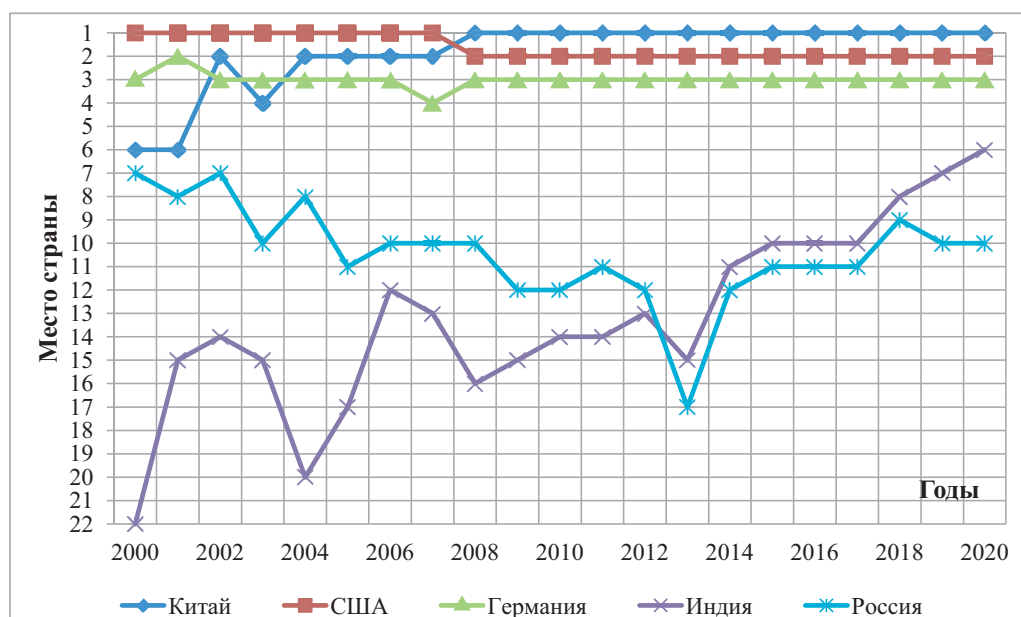


Рисунок 4. Изменение положения стран по количеству публикуемых работ

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

(США; 99). Как видим, в списке преобладают ИКТ-компании из США и Японии. Активно участвуя в исследованиях, они стремятся разрешить имеющиеся неопределенности в развитии квантовых технологий, что могло бы дать им в перспективе стратегические и коммерческие преимущества. На долю корпоративного сектора совокупно приходится более

4.2% мировых публикаций по КОИ, в Японии – около 20%, США – около 10%. Эти значения превышают, например, аналогичные показатели для нанопотоники [23].

Примечательна высокая исследовательская активность японских корпораций в квантовой криптографии. Если в Китае и России внутренние рейтинги по количеству

публикаций в этой подобласти возглавляют академии наук этих стран, а в США – Массачусетский технологический институт, то в Японии это «Nippon Telegraph Telephone Corporation».

Другой пример: значительный вклад в публикационный выход Великобритании по квантовой криптографии принадлежит Кембриджской исследовательской лаборатории, которая является важной частью всемирной сети исследований и разработок «Toshiba Corporation». Даже в открытой части американские исследования по КОИ заметно милитаризованы. Так, на долю Министерства обороны и военно-исследовательских структур (таких как исследовательские лаборатории видов вооруженных сил или командование исследований, разработок и инженерии армии США) пришлось 3.4% публикационного выхода страны, а более 9% публикаций за 2008–2020 гг. спонсировались такими организациями, как DARPA и IARPA³. Кроме того, 8.4% составляет публикационный вклад Министерства энергетики США вместе с национальными лабораториями, многие из которых работают на военные цели. Например, Лос-Аламосская национальная лаборатория, ведущая

в США работы по ядерному оружию, участвовала в 2.7% всех американских публикаций по КОИ и 31.8% публикаций самого министерства. Военно-промышленные компании («Raytheon Technologies Corporation», «Northrop Grumman Corporation» и др.) также вносят свою лепту.

Тем не менее основной вклад в исследования все же за университетами, в первую очередь ведущими: помимо лидеров – системы Калифорнийского университета и Массачусетского технологического института (рисунок 5) – 11.6% национальных публикаций на счете восьми престижных университетов из Лиги плюща. Хотя вклад Китайской академии наук (КАН) в публикационный выход страны превысил 23%, основными участниками публикуемых исследований и здесь выступают университеты. Да и участником более половины публикаций самой КАН является входящий в ее структуру Научно-технический университет Китая. Тем не менее в ряде стран проведение исследований по КОИ довольно централизовано: так, во Франции и России на долю Национального центра научных исследований и Российской академии наук приходится 69 и 54% национальных публикаций соответственно.



Рисунок 5. Наиболее продуктивные организации в области КОИ, 1990–2020 гг.

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

³ DARPA – Агентство передовых оборонных исследовательских проектов; IARPA – Агентство передовых исследований в сфере разведки.

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КООПЕРАЦИЯ (СОВАВТОРСТВО)

Характерной чертой современных исследований является расширение глобальной научной сети и рост международной кооперации [24], которые способствуют мобилизации талантливых ученых разных стран на развитие прорывных направлений. Учитывая деликатность решаемых задач и высокую конкуренцию, интересно представить, насколько это свойственно исследованиям по КОИ. Наш расчет показал рост доли мировых КОИ-публикаций, выполняемых международными коллективами ученых: с 21.5% в 2000 г. до 30.0% в 2010 и 33.8% – в 2020 гг. Это означает, что, несмотря на конфиденциальность, все большая часть исследований в области проводилась на глобальном уровне. Однако даже страны из 1-й десятки заметно отличаются по степени международной научной кооперации в КОИ (таблица 1). Наиболее замкнут Китай, открыта Канада. Аналогично другим областям высок показатель сотрудничества у европейских стран, к которым примыкает Австралия. В относительно умеренной степени сотрудничают с другими странами США, Россия и Япония. Заметим, что большая конфиденциальность работ по криптографии не для всех стран сопровождается снижением международной кооперации; тем не менее в случаях России и Китая такое

снижение выглядит значительным (таблица 1). Острое соперничество в верхнем эшелоне не помешало, однако, США и Китаю быть наиболее предпочтительными партнерами друг для друга с растущей силой соавторских связей в терминах показателя Солтона (см. [23]). Международное сотрудничество существенно повышает видимость отечественных КОИ-публикаций: а) международно-соавторские работы России цитировались в среднем от 3 до 18 раз (по годам выхода) чаще автономных; б) из 168 российских работ по КОИ, вошедших в состав 10% наиболее цитируемых мировых публикаций, ~92% имели международное соавторство.

Россия за весь период имела кооперационные связи с 65 странами, причем в списке ее партнеров первые семь – это члены G7. «Выгоду» от сотрудничества с разными странами помогает оценить рисунок 6, на котором страны – партнеры России упорядочены по доле совместных работ, попавших в мировой Топ-10% сегмент по цитированию. Из рисунка, в частности, следует: сотрудничество с США несколько предпочтительнее, чем с Германией; сотрудничество с Францией, Великобританией и Италией дает заметный и примерно одинаковый выигрыш в «качестве»; самый малозаметный выигрыш для России от сотрудничества со Швецией; наконец, наиболее эффективно с точки зрения попадания в Топ-10% сегмент

Таблица 1

Показатели научной кооперации первой десятки стран

№	Страна	Доля публикаций с международным соавторством, %	
		КОИ	Криптография
1	США	44.4	42.2
2	Китай	23.7	17.5
3	Германия	66.7	61.4
4	Великобритания	63.4	58.7
5	Япония	41.5	36.3
6	Канада	67.5	69.6
7	Италия	55.1	54.4
8	Франция	63.7	64.1
9	Австралия	64.7	66.4
10	Россия	43.4	25.4

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

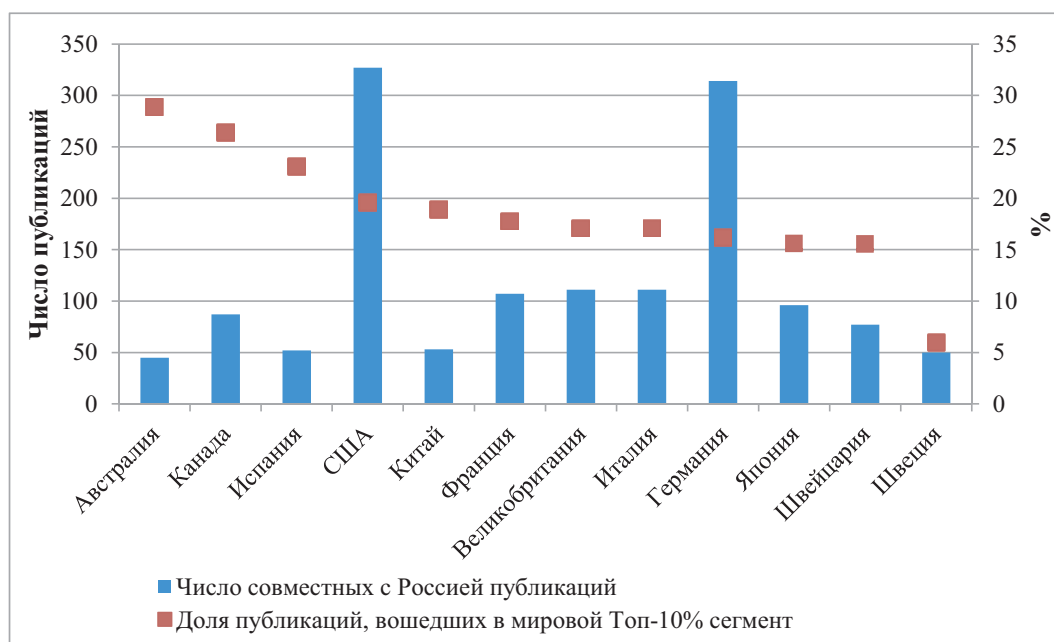


Рисунок 6. Страны с наибольшим количеством публикаций, выполненных в соавторстве с Россией, и доля публикаций, относящихся к 10% наиболее цитируемых (мировой Топ-10% сегмент). Страны упорядочены по доле публикаций, относящихся к 10% наиболее цитируемых

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

мировых публикаций выглядит сотрудничество с Австралией, Канадой и Испанией, хотя, конечно, определенную роль в этом, как и в случае с Китаем, мог сыграть эффект «третьей стороны». Примерно 27% всех российских публикаций были выполнены в соавторстве с кем-либо из «четверки» ведущих западных стран (США, Германия, Великобритания, Франция), причем 15.4% без участия «третьей стороны». Эта пропорция оказалась достаточно

устойчивой (таблица 2), на нее пока заметно не повлияла начавшаяся в последние годы политизация науки. Хотя если в последний период сотрудничество России только с «четверкой» в области КОИ немного сократилось, то при участии в нем «третьей стороны», напротив, выросло.

Рассмотрим далее организационную и географическую структуры российских исследований.

Таблица 2

Показатели научного сотрудничества России с «четверкой» ведущих западных стран

Период времени	Доля российских публикаций, выполненных в соавторстве с США, Германией, Великобританией или Францией, %	
	всего	без «третьей» стороны
2001–2005 гг.	26.6	15.4
2006–2010 гг.	25.8	15.6
2011–2015 гг.	25.7	16.2
2016–2020 гг.	28.7	14.7

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

РОССИЙСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЛАНДШАФТ: ОСОБЕННОСТИ И ТРЕНДЫ

Согласно таблице 3, основными отечественными участниками исследований являются НИИ РАН, университеты, а также специально созданный в 2011 г. Российский квантовый центр. По публикационному вкладу университеты совокупно обошли РАН в 2014 г., что можно отнести на счет целенаправленно проводимой политики децентрализации исследований в нашей стране. Однако при этом нельзя не отметить, что собственный вклад университетов (доля публикаций без международного и внутреннего межсекторального соавторства) заметно снизилась: с 50% в 1993–2006 гг. до 25% в 2007–2020 гг. В терминах цитируемости КОИ-публикации РАН несколько «качественнее», чем университетов (таблица 3, столбец 5). Можно отметить ФТИ РАН и ИТМО как эффективных производителей высоко цитируемых публикаций. Однако наибольшая пропорция таких публикаций (15.1%)

все же у Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН. Его сотрудники (в том числе работающие за рубежом) опубликовали 13 статей, процитированных более 100, две – более 1000 раз; выходцу из этого института А.Ю. Китаеву принадлежит самая цитируемая российская публикация, посвященная отказоустойчивым квантовым вычислениям с помощью энионов.

Вклад крупных отечественных корпораций довольно скромнен: 53 публикации по КОИ выполнил Росатом (в основном силами ФГУП ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова), 2 – РЖД. Такие профильные компании, как «Яндекс», «Сбер», «Мэйл. ру», «Лаборатория Касперского», практически не имеют публикаций. Наукоемкий коммерческий сектор в КОИ формируется пока за счет молодых стартапов («QRate», «Quanttelecom LLC», «QAPP», «DEPHAN» и др.), выращиваемых преимущественно в РКЦ. В целом вклад корпоративно-коммерческого сектора страны составил около 3.4% всех отечественных публикаций, что

Таблица 3

Наиболее продуктивные в КОИ российские организации

№	Институт/организация	Количество публикаций	Количество публикаций, вошедших в мировой Топ-10% сегмент	Пропорция публикаций, вошедших в мировой Топ-10% сегмент, %
1	МГУ	433	5	1.2
2	ФИ РАН	323	21	6.5
3	МФТИ	294	9	3.1
4	РКЦ	229	24	10.5
5	МИАН РАН	177	7	4.0
6	ИФТТ РАН	155	4	2.6
7	ФТИ РАН	141	20	14.2
8	ИТМО	136	17	12.5
9	МИСИС	134	12	9.0
10	КФТИ КазНЦ РАН	116	1	0.9
	УНИВЕРСИТЕТЫ	1947	71	3.6
	РАН	1661	87	5.2

Примечание: МГУ – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; ФИ РАН – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; МФТИ – Московский физико-технический институт (государственный университет); РКЦ – Российский квантовый центр; МИАН РАН – Математический институт им. В.А. Стеклова РАН; ИФТТ РАН – Институт физики твердого тела РАН; ФТИ РАН – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН; ИТМО – Университет ИТМО; МИСИС – НИТУ «МИСиС»; КФТИ КазНЦ РАН – Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

меньше среднемирового показателя. Участниками примерно 1.5% российских публикаций были зарубежные корпорации.

Таблица 4 представляет публикационный вклад основных российских городов (наукоградов). Уже по ней видна сильная концентрация исследований по КОИ в двух «научных столицах». В динамике вес условного «центра» (Московской и Санкт-Петербургской агломераций) в производстве научного знания, за

исключением начальной точки, был выше 70, а в отдельные годы и 80%; в то же время «остальная Россия» не смогла устойчиво преодолеть рубеж в 30%, несмотря на то, что в нее входят такие крупные наукопроизводящие города, как Новосибирск, Казань, Нижний Новгород, Томск и др. (рисунок 7). Это означает, что говорить о сколь-либо выраженной географической деконцентрации исследований по КОИ пока не приходится.

Таблица 4

Российские города/наукограды с наибольшим количеством публикаций по КОИ

№	Город/наукоград	Количество публикаций	Доля публикаций, %	Предпочтительная страна-партнер
1	Москва	1608	52.3	Германия
2	Санкт-Петербург (Ленинград)	525	17.1	США
3	Долгопрудный	294	9.6	Германия
4	Черноголовка	273	8.9	Израиль
5	Казань	238	7.7	США
6	Сколково	205	6.7	США
7	Новосибирск	186	6.1	Германия
8	Нижний Новгород	89	2.9	США
9	Дубна	81	2.6	Швейцария
10	Томск	53	1.7	Германия

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

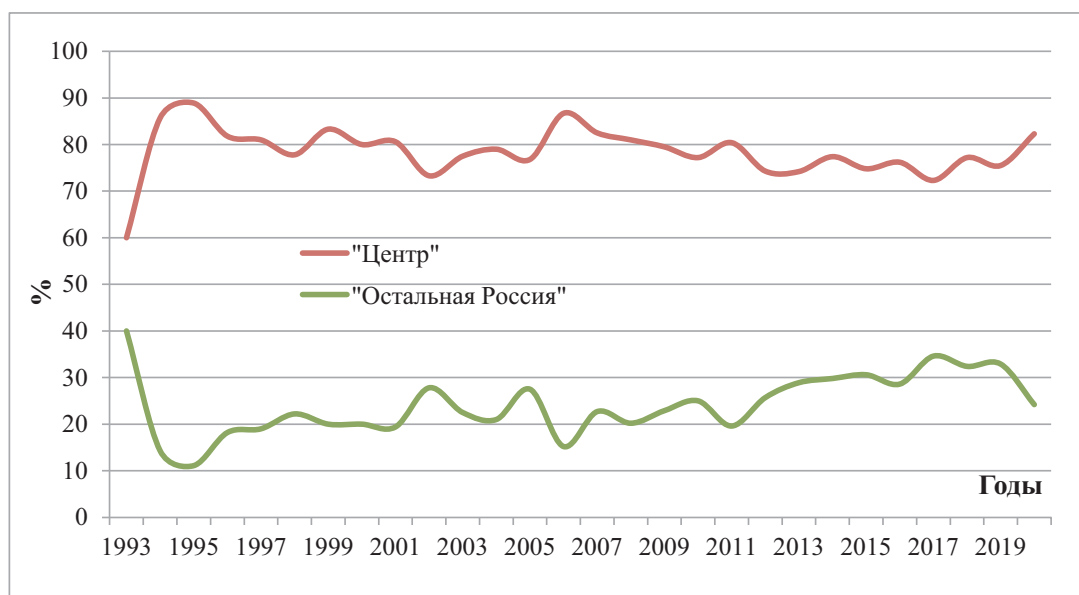


Рисунок 7. Вклад в публикационный выход страны «центра» и «остальной России»

Источник: Web of Science Core Collection, данные на 25.09.2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникнув из потребности измерять результаты науки и оформившись как таковая в 1960-е гг., библиометрия со временем превратилась в достаточно полезный и широко применяемый инструмент анализа динамики и структуры науки. Ее роль особенно высока в случае появляющихся научных направлений, для которых пока еще нет надежных экономических данных, позволяющих оценивать результативность и конкурентные позиции стран. Так, с конца 1990-х гг. с подачи США библиометрия стала основным методом измерения прогресса в нанотехнологиях, породив за два десятилетия мощный кластер нанобиблиоаналитики (см., например, [25]). Отражая бурно растущий мировой интерес к квантовым технологиям, в последние годы уже вышел ряд работ, посвященных изучению их развития с библиометрических позиций.

Настоящий анализ выполнен на основе углубленной разработки поискового запроса, который применен к журнальным публикациям, индексируемым в двух политематических базах из ядерной коллекции Wo S. По его итогам отметим:

1. После некоторого замедления в последнее десятилетие возобновился экспоненциальный рост исследований по КОИ, драйвером которого послужили знаковые технологические достижения, а также массивные инвестиции. Мировая гонка за «квантовое будущее» приобрела реалистические черты. О высоком «пороге» вхождения в эту гонку говорят, в частности, участие в ней лучших научных организаций мира и значительная концентрация исследований: до 80% публикационного выхода мира приходилось на долю десяти наиболее продуктивных стран, включая членов группы G7, а России – на долю Московской и Санкт-Петербургской агломераций. Высокие экономические ожидания подтверждает участие уже на стадии исследований крупных корпораций, особенно из Японии, а стремление получить в перспективе военно-стратегические преимущества – участие военно-исследовательских структур, в первую очередь из США.

2. Межстрановое соперничество в КОИ не исключало, тем не менее, высокий уровень международной кооперации: так, более трети мировых публикаций в 2020 г. были выполнены

международными командами ученых. Даже в такой чувствительной подопласти, как квантовая криптография, доля таких публикаций в 2020 г. составила 27.5%. Доля международно-соавторских публикаций в КОИ у России (~43%) гораздо выше, чем среди всех публикаций (~30%), но ниже, чем, например, в нанофотонике (~48%). Этот показатель довольно важен, поскольку в большой степени влияет на видимость отечественных работ. Интересно, что, вопреки возобновившейся в последнее время политизации науки, в КОИ интенсивность сотрудничества России с «четверкой» ведущих западных стран (при участии «третьей стороны») к концу периода даже выросла, тогда как по всем публикациям и в нанофотонике упала.

3. К факторам, формирующим российский исследовательский ландшафт, относятся: глубоко укоренившаяся академическая традиция в организации фундаментальных исследований, наличие созданных в советские годы и сохранивших свой потенциал наукоградов, проводимая научными властями страны в последние 15 лет университетско-центристская политика и необходимость замещения утраченного отраслевого звена отечественной научной системы. Анализ показал следующее:

- хотя по количеству производимых КОИ-публикаций университеты совокупно превзошли РАН, по вкладу в мировой Топ-10% сегмент высоко цитируемых публикаций ей уступают. Ученым из РАН принадлежат также самые высоко цитируемые (получившие более 1000 ссылок) российские публикации;
- профильные наукограды (даже без классических академгородков типа Новосибирского) внесли заметный вклад (~25%) в публикационный выход страны;
- несмотря на определенную децентрализацию исследований (перенос центра тяжести в университеты), доминирование «центра» сохраняется;
- на фоне активного собственного участия в исследованиях крупных зарубежных компаний отечественный корпоративно-коммерческий сектор представлен довольно слабо (возможно, в силу закрытости работ), что диссонирует с растущими ожиданиями глобальных коммерческих выгод от квантовых технологий.

Начатый библиометрический анализ области в дальнейшем мог быть направлен на изучение схем спонсорской поддержки публикаций,

соавторских связей на институциональном уровне, более детальное рассмотрение показателей цитирования и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нильсен М., Чанг И. (2006) Квантовые вычисления и квантовая информация. – М.: Мир. – 824 с.
2. Hidary J.D. (2019) Quantum Computing: An Applied Approach. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG. – 379 p.
3. Nielsen M. (2018) In what sense is quantum computing a science? <https://cognitivemedium.com/qc-a-science>.
4. Baumhof A. (2019) Quantum leap: why the next wave of computers will change the world. <https://www.weforum.org/agenda/2019/10/quantum-computers-next-frontier-classical-google-ibm-nasa-supremacy/>.
5. Montanaro A. (2016) Quantum algorithms: an overview // npj Quantum Information. 2(Article number 15023). <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23>.
6. Bishnoi B. (2020) Quantum-Computation and Applications. 186 p. https://www.researchgate.net/publication/341926965_Quantum-Computation_and_Applications/link/5ed9bb6492851c9c5e817214/download.
7. Bova F., Goldfarb A., Melko R.G. (2021) Commercial applications of quantum computing // EPJ Quantum Technology. 8(2): 13 p. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1>.
8. ATARC Quantum Working Group (2021) Applied Quantum Computing for Today's Military. 7 p. <https://atarc.org/wp-content/uploads/2021/05/ATARC-Military-Paper-by-Quantum-Working-Group.pdf>.
9. Kung J., Fancy M.A. (2021) Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Technology / Canadian Institute for Advanced Research. Canada, Toronto. 57 p. <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/04/quantum-report-EN-10-accessible.pdf>.
10. Fedorov A.K., Akimov A.V., Biamonte J.D., Kavokin A.V. et al. (2019) Quantum technologies in Russia // Quantum Science and Technology. 4(4): 8 p. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab4472>.
11. Dhawan S.M., Gupta B.M., Bhushan S. (2018) Global publications output in quantum computing research: A scientometric assessment during 2007–16 // Emerging Science Journal. 2(4): 228–237. DOI: <http://dx.doi.org/10.28991/esj-2018-01147>.
12. Kumar V., Santhosh Kumar K.T., Biradar B.S. (2018) Scientometrics Analysis of Quantum Computing Literature During 2011–2017 // Journal of Advanced Research in Library and Information Science. 5(4): 26–30.
13. Tolcheev V.O. (2018) Scientometric analysis of the current state and prospects of the development of quantum technologies // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 52(3): 121–133. DOI: 10.3103/S000510551803007X.
14. Терехов А.И. (2019) Квантовая обработка информации: библиометрический взгляд // Прикладная информатика. 14(3): 55–65. DOI: 10.24411/19938314201910015.
15. Bornmann, L., Haunschild, R., Scheidsteger, T., Ettl, C. (2019) Quantum technology – a bibliometric analysis of a maturing research field. 32 p. https://figshare.com/articles/preprint/Quantum_technology_a_bibliometric_analysis_of_a_maturing_research_field/9731327.
16. Terekhov A.I. (2020) Bibliometric trends in quantum information processing // Scientific and Technical Information Processing. 47(2): 94–103. <https://doi.org/10.3103/S0147688220020021>.
17. Scheidsteger T., Haunschild R., Bornmann L., Ettl C. (2021) Quantum technology 2.0 – topics and contributing countries from 1980 to 2018. Preprint. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2105/2105.08750.pdf>.
18. Seskir Z.C., Aydinoglu A.U. (2021) The landscape of academic literature in quantum technologies // International Journal of Quantum Information. 19(2). <https://doi.org/10.1142/S021974992150012X>.
19. Wang J., Shen L., Zhou W. (2021) A bibliometric analysis of quantum computing literature: mapping and evidences from scopus // Technology Analysis & Strategic Management. 33(11): 1347–1363. DOI: 10.1080/09537325.2021.1963429.
20. Gupta B.M., Dhawan S.M., Mamdapur G.M. (2021) Quantum cryptography research: A scientometric assessment of global publications during 1992–2019 // Science & Technology Libraries. 40(3): 282–300. <https://doi.org/10.1080/0194262X.2021.1892563/>
21. Dhawan S.M., Gupta B.M., Mamdapur G.M. (2021) Quantum machine learning: A scientometric assessment of global publications during 1999–2020 // International Journal of Knowledge Content Development & Technology. 11(3): 29–44.
22. Overview on quantum initiatives worldwide – update mid (2021) / UK, Glasgow: QURECA Ltd. <https://www.quireca.com/overview-on-quantum-initiatives-worldwide-update-mid-2021/>.

23. Терехов А.И. (2021) Библио- и патентометрический анализ развития нанофотоники: 2000–2020 годы // Фотоника. 15(5): 378–394. DOI: 10.22184/1993–7296.FRos.2021.15.5.378.394.
24. Wagner C.S., Park H.W., Leydesdorff L. (2015) The continuing growth of global cooperation networks in research: A conundrum for national governments // PLOS ONE. 10(7): e0131816. doi:10.1371/journal.pone.0131816.
25. Stirling D.A. (2018) The Nanotechnology Revolution: A Global Bibliographic Perspective. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte Ltd. 2018. 448 p.

Информация об авторе

Терехов Александр Иванович – ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной эконометрики, Центральный экономико-математический институт Российской академии наук; Scopus Author ID: 25946720500 (Российская Федерация, 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 47; e-mail: alex.i.terekhov@gmail.com).

A.I. TEREKHOV,

Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation; e-mail: alex.i.terekhov@gmail.com)

ON THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC BASE OF QUANTUM TECHNOLOGIES

UDC: 001

<https://doi.org/10.22394/2410–132X-2022-8-1-58-72>

Abstract: The purpose of the article is to study the development of research in the field of quantum technologies, based on a bibliometric analysis of publications indexed in databases from the Web of Science Core Collection from 1990 to 2020. The global output of publications, the productivity of individual countries and organizations, indicators of international scientific cooperation are considered. The characteristic features of world studies in the field are revealed: a high concentration in the group of leaders, a noticeable participation of corporations and military scientific structures, and growing international cooperation. Considerable attention is paid to the positions of Russia, which towards the end of the period returned to the top ten countries in terms of productivity. The Russian Academy of Sciences is the sixth among the world scientific organizations in the production of publications on quantum technologies for the entire period; Russian scientists actively cooperate with foreign scientists, including those from leading Western countries. The internal landscape is characterized by a significant predominance of the “Center”, where the country’s leading research institutes and universities are located, and the still small research contribution of the Russian commercial sector.

Keywords: quantum technologies, quantum information processing, scientific publication, database, bibliometric analysis

For citation: Terekhov A.I. On the Development of the Scientific Base of Quantum Technologies. *The Economics of Science*. 2022; 8(1):58-72. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2022-8-1-58-72>

REFERENCES

1. Nielsen M., Chuang I. (2006) Quantum Computation and Quantum Information. M.: MIR. 2006. 824 p. (In Russ.)
2. Hidary J.D. (2019) Quantum Computing: An Applied Approach. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG. 2019. 379 p.
3. Nielson M. (2018) In what sense is quantum computing a science? <https://cognitivemedium.com/qc-a-science>.
4. Baumhof A. (2019) Quantum leap: why the next wave of computers will change the world. <https://www.weforum.org/agenda/2019/10/quantum-computers-next-frontier-classical-google-ibm-nasa-supremacy/>.
5. Montanaro A. (2016) Quantum algorithms: an overview // npj Quantum Information. 2(Article number 15023). <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23>.
6. Bishnoi B. (2020) Quantum-Computation and Applications. 186 p. https://www.researchgate.net/publication/341926965_Quantum-Computation_and_Applications/link/5ed9bb6492851c9c5e817214/download.
7. Bova F., Goldfarb A., Melko R.G. (2021) Commercial applications of quantum computing // EPJ Quantum Technology. 8(2): 13 p. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1>.
8. ATARC Quantum Working Group (2021) Applied Quantum Computing for Today’s Military. 7 p. <https://atarc.org/wp-content/uploads/2021/05/ATARC-Military-Paper-by-Quantum-Working-Group.pdf>.
9. Kung J., Fancy M.A. (2021) Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Tech-

- nology. Canada, Toronto: Canadian Institute for Advanced Research. 57 p. <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/04/quantum-report-EN-10-accessible.pdf>.
10. Fedorov A.K., Akimov A.V., Biamonte J.D., Kavokin A.V. et al. (2019) Quantum technologies in Russia // *Quantum Science and Technology*. 4(4): 8 p. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab4472>.
 11. Dhawan S.M., Gupta B.M., Bhusan S. (2018) Global publications output in quantum computing research: A scientometric assessment during 2007–16 // *Emerging Science Journal*. 2(4): 228–237. DOI: <http://dx.doi.org/10.28991/esj-2018-01147>.
 12. Kumar V., Santhosh Kumar K.T., Biradar B.S. (2018) Scientometrics Analysis of Quantum Computing Literature During 2011–2017 // *Journal of Advanced Research in Library and Information Science*. 5(4): 26–30.
 13. Tolcheev V.O. (2018) Scientometric analysis of the current state and prospects of the development of quantum technologies // *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 52(3): 121–133. DOI: 10.3103/S000510551803007X.
 14. Terekhov A.I. (2019) Quantum information processing: A bibliometric glance // *Applied Informatics*. 14(3): 55–65 (In Russ.)
 15. Bornmann, L., Haunschild, R., Scheidsteger, T., Ettl, C. (2019) Quantum technology – a bibliometric analysis of a maturing research field. 32 p. https://figshare.com/articles/preprint/Quantum_technology_a_bibliometric_analysis_of_a_maturing_research_field/9731327.
 16. Terekhov A.I. (2020) Bibliometric trends in quantum information processing // *Scientific and Technical Information Processing*. 47(2): 94–103. <https://doi.org/10.3103/S0147688220020021>.
 17. Scheidsteger T., Haunschild R., Bornmann L., Ettl C. (2021) Quantum technology 2.0 – top-ics and contributing countries from 1980 to 2018. Preprint. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2105/2105.08750.pdf>.
 18. Seskir Z.C., Aydinoglu A.U. (2021) The landscape of academic literature in quantum technologies // *International Journal of Quantum Information*. 19(2). <https://doi.org/10.1142/S021974992150012X>.
 19. Wang J., Shen L., Zhou W. (2021) A bibliometric analysis of quantum computing literature: mapping and evidences from scopus // *Technology Analysis & Strategic Management*. 33(11): 1347–1363. DOI: 10.1080/09537325.2021.1963429.
 20. Gupta B.M., Dhawan S.M., Mamdapur G.M. (2021) Quantum cryptography research: A scientometric assessment of global publications during 1992–2019 // *Science & Technology Libraries*. 40(3): 282–300. <https://doi.org/10.1080/0194262X.2021.1892563/>
 21. Dhawan S.M., Gupta B.M., Mamdapur G.M. (2021) Quantum machine learning: A scientometric assessment of global publications during 1999–2020 // *International Journal of Knowledge Content Development & Technology*. 11(3): 29–44.
 22. Overview on quantum initiatives worldwide – update mid (2021) / UK, Glasgow: QURECA Ltd. <https://www.quireca.com/overview-on-quantum-initiatives-worldwide-update-mid-2021/>
 23. Terekhov A.I. (2021) Biblio- and patentometric analysis of the development of nanophotonics: 2000–2020 // *Photonics Russia*. 15(5): 378–394. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.5.378.394.
 24. Wagner C.S., Park H.W., Leydesdorff L. (2015) The continuing growth of global cooperation networks in research: A conundrum for national governments // *PLOS ONE*. 10(7): e0131816. doi:10.1371/journal.pone.0131816.
 25. Stirling D.A. (2018) *The Nanotechnology Revolution: A Global Bibliographic Perspective*. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte Ltd. 2018. 448 p.

Author

Alexandr I. Terekhov – Leading Researcher at the Central Economics and Mathematics Institute, The Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 25946720500 (Russian Federation, 117418, Moscow, Nakhimovsky Pr., 47; e-mail: alex.i.terekhov@gmail.com).