



Библиометрический анализ академической литературы по квантовой обработке информации

А. И. Терехов
ЦЭМИ РАН, Москва, Россия

Рассмотрены исторические вехи и выполнен библиометрический анализ развития исследований в области квантовой обработки информации в период 1990–2020 годов. В центре внимания глобальный выход научных публикаций, продуктивность отдельных стран и организаций, международная научная кооперация. С помощью библиометрических индикаторов показаны: динамизм развития области, высокая степень концентрации исследований и международных научных связей, участие в них, наряду с университетами и академическими организациями, крупных корпораций, особенно из Японии и военно-исследовательских структур, в первую очередь, из США. Для России характерны: высокая концентрация исследований в столичных агломерациях и их существенная интернационализация; ведущий вклад РАН и растущая роль университетов в развитии научной базы квантовых технологий, пока еще слабая вовлеченность в исследования российского коммерческого сектора. Источниками информации для анализа послужили библиографические базы данных Web of Science Core Collection и SCOPUS.

Ключевые слова: квантовая обработка информации; научная публикация; база данных; библиометрический анализ

Статья получена: 29.02.2024

Статья принята: 29.03.2024

Bibliometric Analysis of Academic Literature on Quantum Information Processing

A. I. Terekhov
Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The milestones are reviewed and a bibliometric analysis of the research development in the field of quantum information processing in 1990–2020 is performed. The focus is on the global publication of research papers, productivity of certain countries and organizations, and international scientific cooperation. By means of bibliometric indicators, the following areas are considered: dynamic development of the area, a high concentration degree of research and international academic networking, participation of large-scale corporations in such networks along with the universities and academic institutions, especially from Japan and military research entities, primarily from the USA. Russia is characterized by the following: a high concentration of research in the metropolitan agglomerations and its significant internationalization; significant contribution of the Russian Academy of Sciences and the growing role of universities in the development of the scientific base of quantum technologies, as well as the still weak involvement of the Russian commercial sector in the research activities. The data sources for analysis have been the bibliographic databases: Web of Science Core Collection and SCOPUS.

Key words: quantum information processing; scientific publication; database; bibliometric analysis

Article received: February 29, 2024

Article accepted: March 29, 2024



ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все чаще говорят о второй квантовой революции, которая, благодаря таким квантовым явлениям, как суперпозиция и запутанность, открывает возможности для квантовой обработки информации (КОИ). Считается, что базовые технологии КОИ – квантовые компьютеры и вычисления, квантовая связь и криптография, квантовое зондирование и метрология – совместно с другими революционными технологиями радикально изменят научно-технологический базис развития и социально-экономический облик мира в 21-м веке.

К началу 1980-х годов идея квантовых вычислений витала в воздухе. Среди ее пионеров были американские физики П. Бениофф и Р. Фейнман, советский математик Ю.И. Манин, однако, кристаллизацию этой идеи связывают с выпуском «Международного журнала теоретической физики» за 1982 год, опубликовавшим доклад конференции «Физика вычислений», проведенную годом ранее в США [1]. В своей статье Р. Фейнман высказал тезис, ставший знаменательным для квантовых вычислений: квантовую систему из N частиц нельзя смоделировать на классическом компьютере, поскольку его ресурсы не растут экспоненциально с ростом N ; такое моделирование возможно с помощью компьютера нового типа – «квантового компьютера» [2]. Более десяти лет квантовые компьютеры оставались для ученых лишь интеллектуальным увлечением, пока два американских математика не показали: разложение целого числа на простые множители может быть эффективно выполнено на гипотетическом квантовом компьютере (П. Шор в 1994 году); такой компьютер способен ускорить проведение поиска в неструктурированном поисковом пространстве (Л. Гровер в 1996 году). Эти два практических применения, в особенности, первое, ставящее под угрозу существующие системы криптографии, подстегнули интерес к КОИ, превратив ее в отдельную широко признанную область научных исследований [3]. Этому способствовал еще целый ряд обстоятельств: в начале 1990-х годов стало понятно, что совершенствование традиционных компьютеров, согласно закону Мура, скоро достигнет квантового предела и потребует радикальных технологических изменений; развитие физики, в свою очередь, привело к появлению технологии захваченных ионов, усовершенствованных оптических резонаторов, квантовых точек и других достижений, позволяющих задуматься о создании работоспособных устройств квантовой логики и т. д. [4].

INTRODUCTION

There have recently been increasing discussions about a second quantum revolution that due to the quantum phenomena such as superposition and entanglement, opens up potential for the quantum information processing (QIP). It is believed that the basic QIP technologies (namely, the quantum computers and computing, quantum communication and cryptography, quantum probing and metrology), together with other groundbreaking technologies, will completely change the scientific and technological basis of development and the socio-economic world profile in the 21st century.

By the early 1980s, the idea of quantum computations was in the air. Its pioneers included American physicists P. Benioff and R. Feynman, Soviet mathematician Yu.I. Manin. However, the crystallization of this idea is associated with the 1982 issue of the International Journal of Theoretical Physics that published the proceedings of the Physics of Computation conference held a year earlier in the USA [1]. In his article, R. Feynman expressed a thesis that became significant for quantum computations: a quantum system consisting of N particles cannot be simulated by a classical computer, since its resources do not grow exponentially with N ; such simulation is possible using a new type of computer, namely a “quantum computer” [2]. For more than a decade, the quantum computers remained an intellectual passion for scientists until two American mathematicians demonstrates that factoring an integer into the prime factors could be efficiently performed by a hypothetical quantum computer (P. Shor in 1994); such a computer can speed up the search process in an unstructured search space (L. Grover in 1996). These two practical applications, especially the first one challenging the existing cryptographic systems, encouraged interest in the QIP, while turning it into the separate widely recognized area of scientific research [3]. This was facilitated by a number of other circumstances: in the early 1990s, it became clear that according to the Moore’s law, the improvement of conventional computers would soon reach the quantum limit and require revolutionary technological changes; the development of physics, in turn, led to the occurrence of trapped ion technology, improved optical resonant cavities, quantum dots and other advances that make it possible to develop the efficient quantum locomotion devices, etc. [4].

By the early 2000s, the concept of a quantum computer began to take the features of practical achievability [5]. The development of ever new quantum algorithms [6] shifted the focus of quantum computations to the fight for “quantum supremacy” to stimulate new achievements in various fields: from



К началу 2000-х годов идея квантового компьютера стала обретать черты практической достижимости [5], а разработка все новых квантовых алгоритмов [6] сместило центр внимания квантовых вычислений на борьбу за «квантовое превосходство» для стимулирования новых достижений в разных областях: от химии, материаловедения, фармацевтики до перспективного производства, оптимизации трафика, банковского дела, искусственного интеллекта, кибербезопасности, оборонной сферы и т.д. [7-10]. Хотя формальное превосходство квантового компьютера над классическим было продемонстрировано в 2019 году в США и в 2020 году в Китае, вопрос о полезном «квантовом превосходстве» пока остается открытым. Появление полезного отказоустойчивого квантового компьютера – главной цели мировой «квантовой гонки» – по оценкам экспертов, можно ожидать лишь через 10–15 лет [11], однако, уже имеющиеся «шумные» квантовые компьютеры промежуточного масштаба способны решать отдельные практические задачи быстрее классических собратьев [12].

Многообещающие рыночные возможности, а также потенциальные угрозы безопасности привели к выработке политик и программ в области КОИ как отдельными странами, так и их союзами и блоками. Создаваемые в разных странах квантовые экосистемы имеют свои особенности. Например, в США и Китае, наряду с государством, высокая роль цифровых гигантов (IBM, Google, Microsoft или Alibaba и Baidu); в США значительно больше, чем в Китае, стартапов, а в Китае более сильно централизованное начало. Не менее 14 стран-членов ЕС имеют национальные квантовые инициативы, в дополнение к которым в 2018 г. принята общеевропейская флагманская инициатива. Ввиду отсутствия цифровых гигантов в ЕС практикуются научно-индустриальные объединения, например, консорциум компаний Airbus, Leonardo, Orange и научных институтов для изучения проекта будущей европейской сети квантовой связи. По аналогии с консорциумом развития квантовой экономики в США создан Европейский консорциум квантовой индустрии. Для стран ЕС не характерна, как для США и Китая, значительная вовлеченность в исследования по КОИ военных.

Хотя Российский квантовый центр (РКЦ) был создан еще в 2011 году, о стратегической важности («сквозных») квантовых технологий Президент РФ В. В. Путин заявил в 2016 году в послании Федеральному Собранию [13]. В 2019 году была утверждена дорожная карта (ДК) развития квантовых технологий с пятилетним бюджетом 51,1 млрд рублей.

chemistry, materials science, pharmaceuticals to the advanced production, traffic grooming, banking, artificial intelligence, cybersecurity, defense, etc. [7-10]. Although the formal superiority of a quantum computer over a classical one was demonstrated in 2019 in the USA and in 2020 in China, the question about any useful “quantum superiority” remains open. According to the experts, the occurrence of an efficient, fault-tolerant quantum computer being the main goal of the global “quantum race” can be expected only in 10-15 years [11]. However, the existing “noisy” intermediate-scale quantum computers are capable of solving certain practical issues faster than their conventional counterparts [12].

The promising market opportunities, as well as potential security threats, have led to the development of policies and programs in the field of QIP by both certain countries and their alliances and alignments. The quantum ecosystems developed in various countries have their own specifications. For example, in the USA and China, the role of digital giants (IBM, Google, Microsoft or Alibaba and Baidu) is high similar to the state. The USA has significantly more startups than China, and China has a more highly centralized basis. At least 14 EU member states have national quantum initiatives, complemented by a pan-European flagship initiative adopted in 2018. Due to the absence of digital giants in the EU, the scientific and industrial associations are quickly developed, for example, a consortium of Airbus, Leonardo, Orange and other research institutes to study the project of a future European quantum communication network. Similar to the consortium for the quantum economics development in the USA, the European Quantum Industry Consortium was established. It is not typical for EU countries to have the significant military involvement in the QIP research in comparison to the United States and China.

Although the Russian Quantum Center (RCC) was established back in 2011, V.V. Putin, the President of the Russian Federation, spoke about the strategic importance of (“end-to-end”) quantum technologies in 2016 in his Address to the Federal Assembly [13]. In 2019, a road map (RM) for the quantum technology development was approved with a five-year budget in the amount of 51.1 billion rubles. The Government of the Russian Federation and several state corporations (Rosatom, Russian Railways and Rostec) signed the deeds of intent in three QIP areas: quantum computations, quantum communications and quantum sensors, respectively [14]. Two out of three developed RMs (prepared by Rosatom and Russian Railways) were approved in 2020. The National Quantum Laboratory was established under the auspices of Rosatom to act



Правительство РФ и Госкорпорации – Росатом, РЖД и Ростех – подписали соглашения о намерениях по трем направлениям КОИ: квантовые вычисления, квантовые коммуникации и квантовые сенсоры, соответственно [14]. Две из трех разработанных ДК – Росатома и РЖД – были утверждены в 2020 году, а под эгидой Росатома создана Национальная квантовая лаборатория – научно-технологический консорциум, ставший основой отечественной квантовой экосистемы [8]. Ввиду важности квантовых технологий для технологического суверенитета в конце 2022 года на их развитие из бюджета РФ выделено не менее 100 млрд рублей, а квантовые вычисления и коммуникации сохранили позиции в списке важных «сквозных технологий» при его пересмотре в 2023 году из-за западных санкций. У нас, как и в ЕС, отсутствуют цифровые гиганты, участие военных в работах по КОИ пока тоже невысоко, а наложенные санкции будут сильно ограничивать возможности международной научной кооперации.

Несмотря на впечатляющие экономические перспективы и коммерческие прогнозы, КОИ в большой мере остается наукой. Только дальнейшие научные исследования способны разрешить все еще значительные неопределенности технологического и рыночного характера, поэтому анализ их развития, в том числе с применением библиометрии представляет интерес. При этом нужно учитывать специфику КОИ. Еще до опубликования П. Шором его знаменитой статьи с ним побеседовал сотрудник Агентства национальной безопасности (АНБ) США, который позже написал: «Такая способность к дешифровке могла бы сделать военные возможности проигравшего почти бесполезными, а его экономику разрушить» [15]. Из документов, обнародованных Э. Сноуденом в 2013 году, выяснилось, что АНБ США выполняло секретную программу создания «криптологически полезного квантового компьютера» для взлома Интернета [16]. Естественно, что интересы военных и спецслужб привели к закрытому характеру части исследований по КОИ, однако, это не делает бесполезным библиометрический анализ академической (открытой) части литературы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Развитие КОИ и ее подобластей уже было предметом библиометрического анализа в ряде работ [17–19]. Отталкиваясь от них, в настоящей статье внесены улучшения в методы поиска релевантных публикаций, направленные на более широкий охват и углубленную детализацию основных тема-

as the research and technological consortium becoming the basis of the domestic quantum ecosystem [8]. Due to the importance of quantum technologies for technological sovereignty, at the end of 2022, at least 100 billion rubles were allocated from the Russian budget for its development, and the quantum computations and communications retained their positions in the list of important “end-to-end technologies” when it was revised in 2023 due to the Western sanctions. Similar to the EU, we do not have any digital giants. The participation of military forces in the QIP studies is also low, and the imposed sanctions will greatly limit the possible international scientific cooperation.

Despite the impressive economic prospects and commercial forecasts, the QIP remains very much a science. Only further scientific research can resolve the significant technological and market uncertainties, thus, their development analysis, including the use of bibliometrics, is of interest. In this case, it is necessary to consider the QIP specifics. Even prior to publication by P. Shor of his famous article, he was interviewed by an employee of the US National Security Agency (NSA), who later wrote: “Such decryption ability could render the loser’s military resources almost useless and destroy its economics” [15]. The documents disclosed by E. Snowden in 2013, demonstrated that the US NSA was implementing a secret program to develop a “cryptologically efficient quantum computer” for hacking the Internet [16]. The interests of the military and intelligence services have definitely led to the confidential nature of some QIP research. However, it does not make the bibliometric analysis of the academic (open) literature useless.

INITIAL DATA

The development of QIP and its subfields has already been the subject of bibliometric analysis in a number of papers [17–19]. On the basis of them, this article makes improvements to the methods of searching for relevant publications, aimed at the wider coverage and in-depth elaboration of the main QIP topics. The prepared search query included more than 250 key terms that covered the three main QIP components (see Appendix). Two databases from the Web of Science Core Collection (WCC) were used as the main data sources: Science Citation Index Expanded (SCIE database) and Conference Proceedings Citation Index – Science (CPCI-S database). The additional data source was the SCOPUS database (SCO). In all cases, the «title – abstract – key» search was applied. The initial series from the SCIE and CPCI-S databases (at the time of study in March 2022) included 80,962 documents being relevant for the QIP (type: *article*,

тик КОИ. Построенный поисковый запрос включал более 250 ключевых терминов, которые охватывали три основные составляющие КОИ (см. Приложение). В качестве основного источника информации использованы две БД из коллекции Web of Science Core Collection (WCC): Science Citation Index Expanded (БД SCIE) и Conference Proceedings Citation Index – Science (БД CPCI-S), дополнительного – БД SCOPUS (SCO). Во всех случаях использован «title – abstract – key» – поиск. Исходная выборка из БД SCIE и CPCI-S (на момент обследования в марте 2022 г.) включала 80962 релевантных для КОИ документа (типа: *article*, *review*, *proceedings paper*, *letter*) за период 1990–2020 гг., которые послужили основой для библиометрических расчетов. Данные из БД SCO использовались в ряде случаев для дополнительных сравнений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Далее, приведены основные результаты анализа в соответствии с поставленными задачами.

Библиометрические показатели формирования научной базы КОИ

Несмотря на разницу в составе и масштабе охватываемых документов, библиометрический расчет по БД WCC и SCO показывает схожую динамику развития мировых исследований по КОИ (сплошные линии на рис. 1): быстрый рост на всем интервале с выраженным ускорением в периоды 1990–2003 и, особенно, 2015–2020 годов. Некоторое замедление роста публикационной активности между 2003 и 2015 годами, отчасти проясняет динамика относительных показателей (пунктирные линии на рис. 1). Исследования по КОИ являются частью изучения квантового мира, поэтому доля КОИ – публикаций в общем потоке «квантовых» публикаций (выделяемых нами с помощью общих терминов {quant} и {quantum}) могла бы отражать динамику интереса глобального сообщества профильных ученых к тематике КОИ. Ускоренное расширение области на начальном этапе (до 2003 года), очевидно, исходило из взрывного интереса профильных ученых к новой тематике, на серединном же этапе (2003–2015 годы) расширение

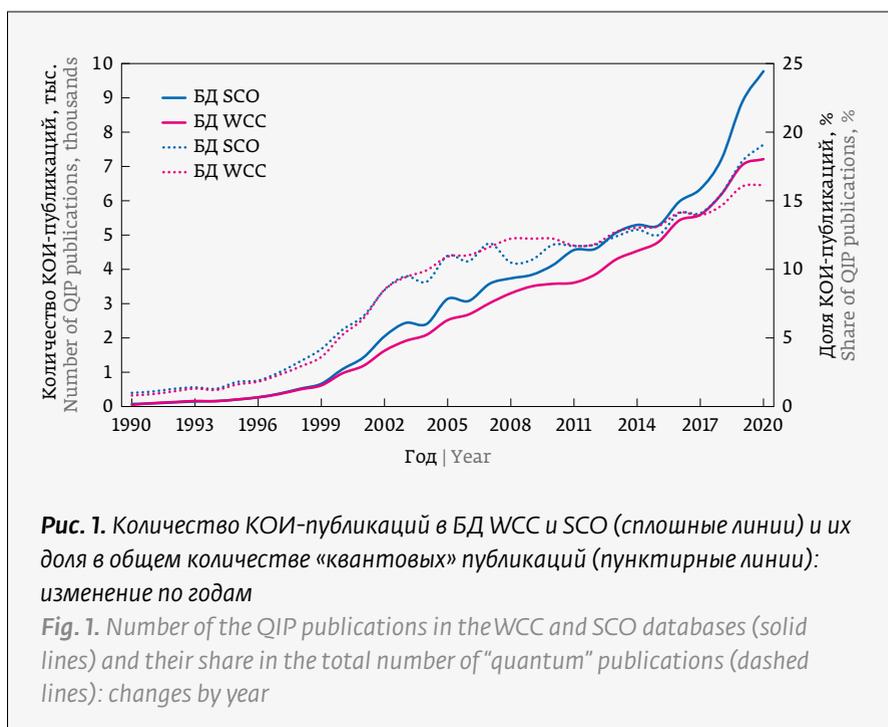
review, *proceedings paper*, *letter*) in 1990–2020 that served as the basis for bibliometric calculations. Information from the SCO database was used in a number of cases for additional comparisons.

RESULTS

The main analytical results are presented below in accordance with the objectives set.

Bibliometric indicators of formation of the QIP scientific base

Despite the difference in the composition and scope of the documents covered, bibliometric calculations based on the WCC and SCO databases demonstrate similar dynamics in the development of global QIP research (solid lines in Fig. 1): rapid growth over the entire interval with a significant acceleration in 1990–2003 and, especially, in 2015–2020. Some kind of slowdown in the growth of publication activity between 2003 and 2015 is partially determined by the dynamics of relative indicators (dashed lines in Fig. 1). The QIP research is a part of the quantum world study, therefore, the share of QIP papers in the total flow of “quantum” publications (identified by us using the general terms {quant} and {quantum}) could indicate the interest dynamics of the global community of field-oriented scientists in QIP. The accelerated expansion of this field at the initial stage (until 2003) was obviously based on the explosive interest of field-



замедлилось, вероятно из-за внутренней стабилизации академического интереса к КОИ (рис. 1), причиной чего мог стать недостаток прорывных идей, практических результатов, целевого финансирования и т.д. Однако «замедление» могло быть связано и с уходом части работ из открытого сегмента. Наиболее быстрый рост начался с 2015 года (рис. 1), когда к исследованиям подключились крупные игроки на технологическом рынке, а правительства большинства технологически развитых стран приняли долгосрочные программы и приступили к созданию необходимой инфраструктуры для развития КОИ.

Долевой показатель заметно варьируется по странам. Согласно рис. 2, его наибольшее отклонение от общемирового тренда характерно для Китая и России. «Спурт» Китая после 1997 года привел его к лидерству по доле КОИ в общем количестве «квантовых» публикаций, достигшей в 2008 году 21,2%. Последовавшее снижение и стабилизацию этой доли (в районе 15%) на фоне растущей государственной поддержки области логично было бы связать с усилением режима секретности китайских исследований. Россия, занимающая по количеству «квантовых» публикаций 6-е место в мире, значительно уступает ему в интересе профильных ученых к проблематике КОИ, хотя с 2013 г. в связи с созданием РКЦ и последующим принятием программных документов этот интерес стал быстро повышаться. Заметным отличием соответствующей кривой для США от общемирового тренда является опережающий рост с 2015 года, который стимулировала национальная приоритезация КОИ. Немецкие профильные ученые поступательно наращивали свой интерес к проблематике КОИ, выйдя на общемировую тренд лишь к концу периода.

В экономико-технологических преобразованиях квантовые технологии будут взаимодействовать с другими революционными технологиями, прежде всего с нанотехнологиями, которые уже признаны мегатрендом 21-го века, приносящим множество прорывных инноваций [20]. Хотя соотношение НАНО- и КОИ-публикаций за период 2000-2022 годов существенно в пользу первых (рис. 3), по среднегодовому темпу роста между

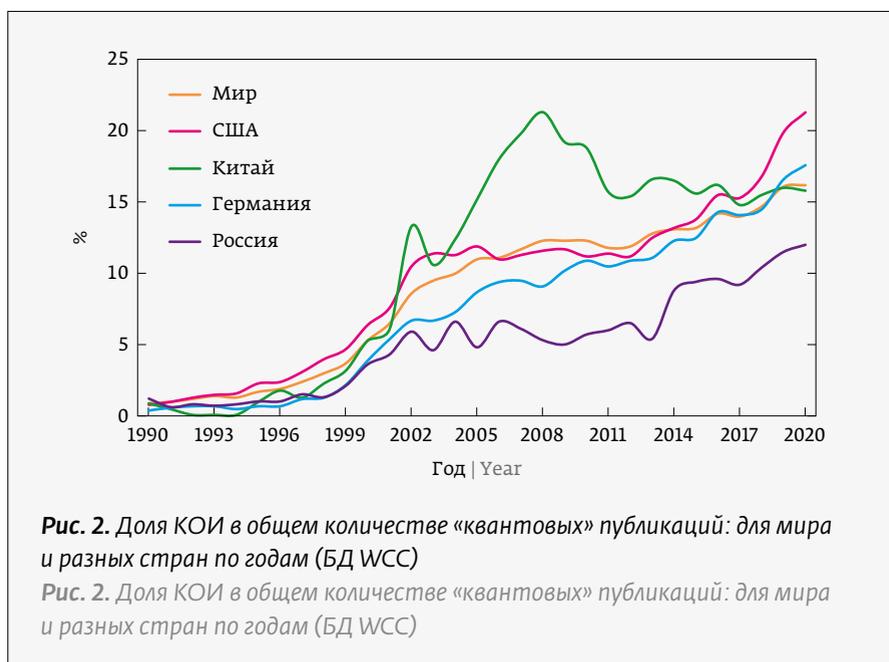


Рис. 2. Доля КОИ в общем количестве «квантовых» публикаций: для мира и разных стран по годам (БД WCC)

Рис. 2. Доля КОИ в общем количестве «квантовых» публикаций: для мира и разных стран по годам (БД WCC)

oriented scientists in new topics. However, at the middle stage (2003–2015) the expansion slowed down, probably due to the internal stabilization of academic interest in the QIP (Fig. 1), the reason for which could be a lack of breakthrough ideas, practical results, targeted funding, etc. However, the “slowdown” could also be due to the withdrawal of some papers from the open segment. The most rapid growth began in 2015 (Fig. 1), when the major players in the technology market joined the studies, and the governments of most technologically developed countries adopted the long-term programs and created the necessary infrastructure for the QIP development.

The share was varied significantly across the countries. According to Fig. 2, its greatest deviation from the global trend is typical for China and Russia. The Chinese “spurt” after 1997 led to its leadership in the QIP share in the total number of “quantum” publications that reached 21.2% in 2008. It would be logical to associate the subsequent decrease and stabilization of this share (around 15%) against the backdrop of growing government support with strengthening of the secrecy regime for Chinese research. Russia that ranks 6th in the world in terms of the number of “quantum” publications, is significantly inferior in the interest of field-oriented scientists in the QIP issues, although since 2013 (due to the RQC establishment and subsequent adoption of program documents) this interest began to be rapidly increased. A noticeable difference between the relevant curve for the USA and the global trend is the higher-than-anticipated growth since 2015 that was stimulated by the national QIP prioritiza-

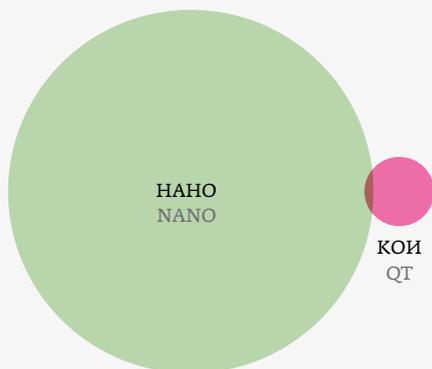


Рис. 3. Соотношение публикаций по нанотехнологиям (НАНО) и квантовым технологиям (КОИ) за период 2000–2022 годов (по базе данных SCOPUS)

Fig. 3. The ratio of publications devoted to the nanotechnology (NANO) and quantum technologies (QT) in 2000–2022 (according to the SCOPUS database)



Рис. 4. Публикационный вклад первой десятки стран, 1990–2020 годы

Fig. 4. Publication contribution of the top ten countries, 1990–2020

2015 и 2022 годами они уступают вторым: 4,8% против 12,3%. Заметно ускорился рост числа тематически пересекающихся публикаций, при этом влияние в большей степени направлено от НАНО к КОИ. На масштабе длин атомов и молекул квантовая механика всегда играет роль, однако, зачастую она не лежит в основе исследования. Напротив, в нанонауке есть области, которые явно используют наносистемы для изучения квантово-механических эффектов и применения их в качестве ресурса в квантовых технологиях (например, полупроводниковые квантовые точки). Как следствие, прогресс в нанонауке способствует лучшей реализации этого ресурса [21].

Основные мировые участники исследований (страны и организации)

В исследованиях по КОИ, хотя бы минимально, участвовали около 120 стран, показательно, что в первую десятку по продуктивности входят все промышленно развитые страны из группы G7, а также Китай, Австралия и Россия (рис. 4). Для производства научного знания характерна высокая степень концентрации, когда на долю первой десяткой стран приходится около 80% публикаций, а публикационный вклад двух лидеров (США и Китая совокупно) вырос с 40 в 2004 до 53% в 2020 году (рис. 5). Первая десятка академических, правительственных и университетских организаций мира, внесших наибольший вклад в исследования по КОИ, пред-

tion. The German field-oriented scientists progressively increased their interest in the QIP issues while entering the global trend only towards the end of the period.

In terms of the economic and technological transformations, quantum technologies shall interact with other revolutionary technologies, primarily nanotechnologies that are already recognized as a 21st century megatrend while leading to many breakthrough innovations [20]. Although the ratio of NANO- and QIP-publications in 2000–2022 is significantly in favor of the former (Fig. 3), they are inferior to the latter in terms of the average annual growth rate between 2015 and 2022: 4.8% versus 12.3%. The growth of the number of thematically intercrossing publications has been noticeably accelerated, while the influence was increasingly directed from NANO to the QIP. The quantum mechanics always plays a significant role at the length scale of atoms and molecules; however, it is often not the basis of research. In contrast, there are fields in the nanoscience that explicitly use nanosystems to study the quantum mechanical effects and use them as a resource in the quantum technologies (e.g., semiconductor quantum dots). As a consequence, the nanoscience progress contributes to better implementation of this resource [21].

Major global study participants (countries and organizations)

At least about 120 countries participated in the QIP research; it is significant that the top ten in terms of productivity includes all industrialized countries

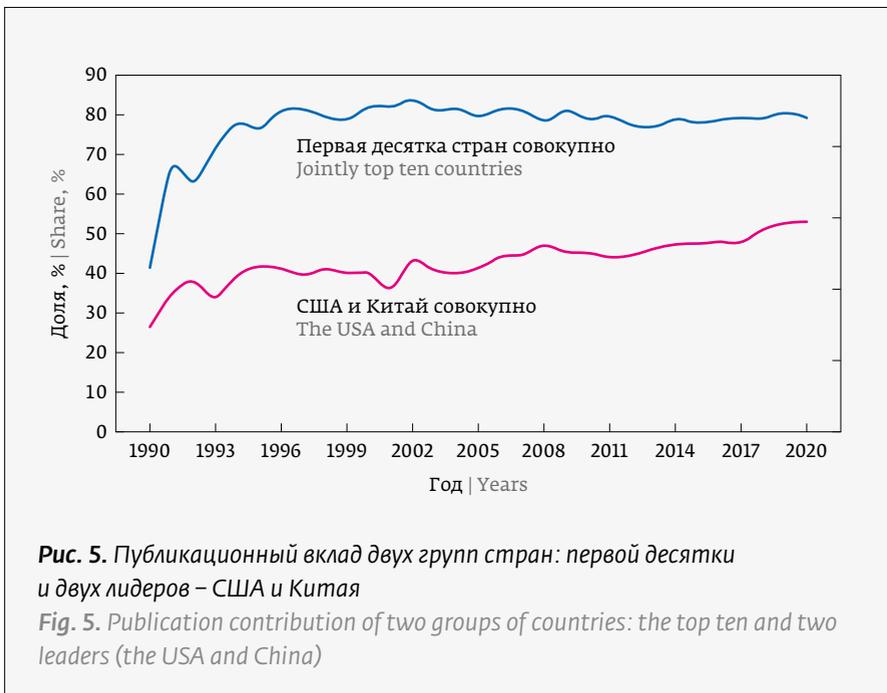


Рис. 5. Публикационный вклад двух групп стран: первой десятки и двух лидеров – США и Китая

Fig. 5. Publication contribution of two groups of countries: the top ten and two leaders (the USA and China)

ставлена на рис 6. О значительных коммерческих ожиданиях говорит также участие в исследованиях крупных корпораций и компаний, в основном, из США и Японии: Nippon Telegraph Telephone Corp. (Япония; 622 публикации); International Business Machines IBM (США; 615); Microsoft Corp. (США; 296); Toshiba Corporation (Япония; 259); Hewlett-Packard (США; 240); Nippon Electric Corp. (Япония; 259); Google Inc. (США; 165); AT&T Inc. (США; 164); Raytheon Technologies Corp. (США; 116); Intel Corp. (США; 99). На долю корпоративного сектора совокупно приходится более 4.2% мировых публикаций по КОИ, в США около 10, в Японии – около 20%. Если в США по количеству публикаций в области квантовой криптографии лидирует МТИ, то в Японии – «Nippon Telegraph Telephone Corporation». Даже в открытой части американские исследования по КОИ заметно милитаризованы, например: на долю МО США вместе с военно-исследовательскими структурами (лаборатории видов вооруженных сил или Командование исследований, разработок и инженерии армии США) пришлось 3,4, а на долю МЭ США вместе с национальными лабораториями – 8,4% публикационного выхода страны. Свою лепту вносят военно-промышленные компании: Raytheon Technologies Corp., Northrop Grumman Corp. и др. Кроме того, в спонсировании более 9% публикаций за 2008–2020 годы участвовали DARPA (Агентство передовых оборонных исследовательских проектов) или IARPA (Агентство передовых

from the G7 group, as well as China, Australia and Russia (Fig. 4). The elaboration of scientific knowledge is specified by a high concentration degree, with the top ten countries accounting for about 80% of publications, and the publication contribution of two leaders (USA and China) increased from 40% in 2004 to 53% in 2020 (Fig. 5). The top ten academic, government and university entities in the world that have made the greatest contribution to the QIP research are given in Figure 6. The significant commercial expectations are also explained by the research participation of the large-scale corporations and companies, mainly from the USA and Japan, such as Nippon Telegraph Telephone Corporation (Japan; 622 publications); International Business Machines IBM (USA; 615); Microsoft Corporation (USA; 296);

Toshiba Corporation (Japan; 259); Hewlett-Packard (USA; 240); Nippon Electric Corporation (Japan; 259); Google Inc. (USA; 165); AT&T Inc. (USA; 164); Raytheon Technologies Corporation (USA; 116); Intel Corporation (USA; 99). The share of the corporate sector jointly accounts for more than 4.2% global QIP publications, in

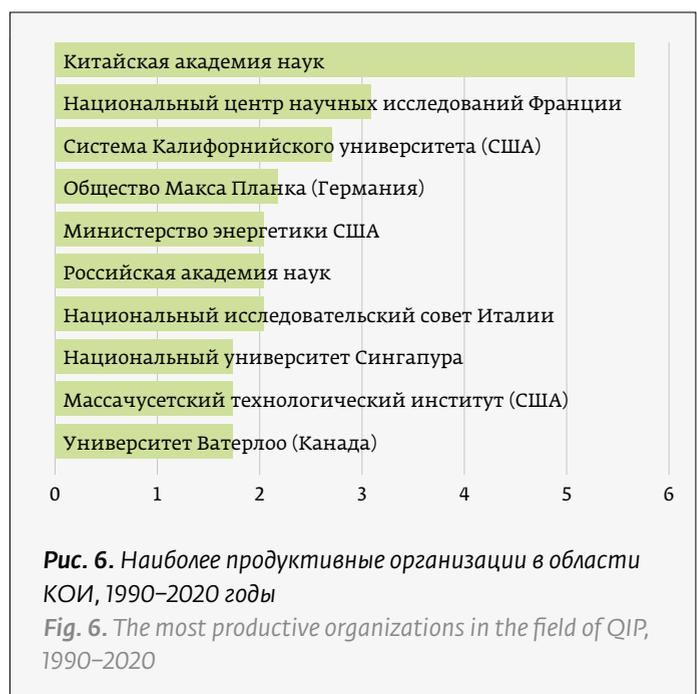


Рис. 6. Наиболее продуктивные организации в области КОИ, 1990–2020 годы

Fig. 6. The most productive organizations in the field of QIP, 1990–2020

исследований в сфере разведки). Тем не менее, основной вклад в исследования все же за университетами, в первую очередь, ведущими: помимо лидеров – системы Калифорнийского университета и МТИ (рис. 6), 11,6% национальных публикаций на счету восьми престижных университетов из «Лиги плюща». Несмотря на большой вклад Академий наук, основными участниками публикуемых исследований по КОИ в России и Китае также выступают университеты. Во Франции же лидирует Национальный центр научных исследований (69% всех публикаций по КОИ).

Международная научная кооперация и соперничество

Важным фактором развития исследований в области КОИ стала международная научная кооперация, рост которой отражает увеличение доли мировых КОИ – публикаций, выполняемых учеными из нескольких стран: с 21,5% в 2000 году до 30,0% в 2010 и 33,8% – в 2020 году. Согласно рис. 7, процент международного соавторства для стран с количеством от 10-ти КОИ – публикаций имеет диапазон кон-

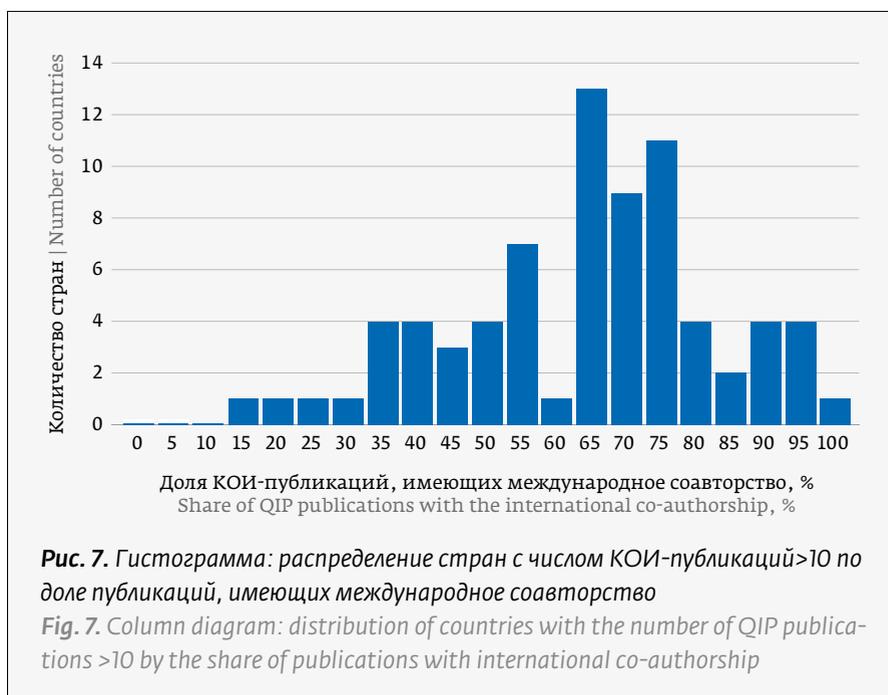


Рис. 7. Гистограмма: распределение стран с числом КОИ-публикаций >10 по доле публикаций, имеющих международное соавторство
Fig. 7. Column diagram: distribution of countries with the number of QIP publications >10 by the share of publications with international co-authorship

the USA it is equal to about 10%, in Japan – about 20%. If in the US MIT is the leader in the number of publications in the field of quantum cryptography, then in Japan it is Nippon Telegraph Telephone Corporation. Even in the open field, the American research devoted to QIP is noticeably militarized, for example, the US Department of Defense, together with the military research entities (laboratories of the armed forces or the US Army Research, Development and Engineering Command) accounted for 3.4%, and the US DOE together with epy national laboratories accounted for 8.4% of the country’s publication output. The military and industrial companies are making their contribution, including Raytheon Technologies Corporation, Northrop Grumman Corporation, etc. In addition, DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) or IARPA (Intelligence Advanced Research Projects Agency) sponsored more than 9% of publications in 2008-2020. However, the main contribution to the research still lies with the universities, first of all, the leading ones: in addition to the leaders (the University of California and MIT) (Fig. 6), 11.6% of national publications belong to the eight prestigious Ivy League universities. Despite the

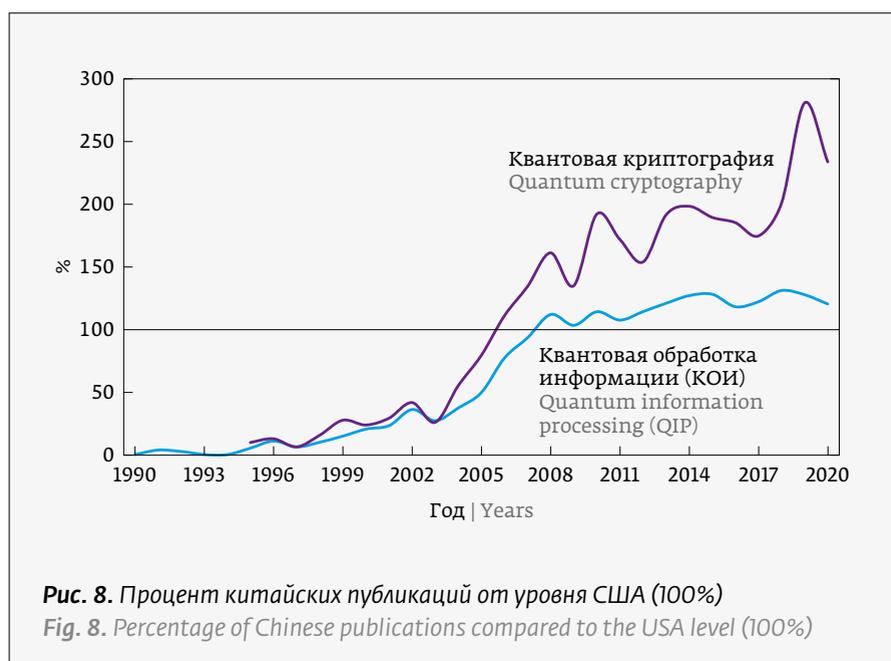


Рис. 8. Процент китайских публикаций от уровня США (100%)
Fig. 8. Percentage of Chinese publications compared to the USA level (100%)



центрации: 65–75%. Из первой десятки стран сюда попадают Канада и Германия (табл. 1). Несколько меньший, но достаточно высокий показатель кооперации у Австралии и других европейских стран. В относительно умеренной степени сотрудничают с другими странами США, Россия и Япония, наиболее самодостаточен Китай. Интересно, что большая конфиденциальность работ по криптографии не для всех стран сопровождается снижением международной научной кооперации; тем не менее, в случаях России и Китая такое снижение выглядит значительным (табл. 1).

Приведенные данные показывают, что быстрое развитие исследований в области КОИ сопровождалось возрастающей долей производства нового научного знания на международном уровне. К сожалению, общая польза от международной научной кооперации все более приносится в жертву политике. Появление квантовых технологий совпало с гонкой США и Китая за глобальное технологическое превосходство, причем США ставят своей целью в ключевых технологиях сохранять уже не просто относительные преимущества, а как можно больший отрыв от конкурентов. Однако явные успехи Китая, особенно в области квантовой связи и криптографии (рис. 8) заставляют США прибегать к санкционной политике. Под другим предлогом в 2022 году США уже ввели беспрецедентные санкции против российской науки, включая экспортный контроль за поставками специальных холодильников, квантового программного обеспечения и облачных сервисов в Россию. В настоящее время обсуждается аналогичный экспортный контроль против Китая. Насаждается и «блоковый» принцип: так, исходя из геополитических интересов, участники альянса AUKUS (Австралии, Великобритании, США) заключили квантовое соглашение для ускорения квантовых возможностей в позиционировании и навигации. Очевидно, такого рода действия не могут способствовать общему прогрессу исследований. Движение России в мировом рейтинге продуктивности в области КОИ показательно: с 7-го места в 2000 она опустилась на 17-е к 2013 г., после чего начался подъем и возвращение в Топ-10 стран в 2018 году; в 2020 году она уступала Франции (9-е место) всего 15 публикаций. Заметную роль в возвращении страны в лидирующую десятку сыграла международная научная кооперация. За 30-летний период Россия имела кооперационные связи с 65 странами, причем в списке ее партнеров первые семь – это члены G7. Вместе с ними, а также Швейцарией и Швецией, Россия входила в наиболее сплочен-

great contribution of the Academies of Sciences, the universities are also the main members in the published QIP research in Russia and China. In France, the National Center for Scientific Research is the leader (69% of all QIP publications).

International scientific cooperation and rivalry

An important factor in the development of research in the field of QIPs has become international scientific cooperation, the growth of which reflects an increase in the share of global QIPs, mainly the publications prepared by the scientists from several countries: from 21.5% in 2000 to 30.0% in 2010 and 33.8% in 2020. According to Fig. 7, the percentage of international co-authorship for the countries with a number of 10

Таблица 1. Показатели международной научной кооперации для первой десятки стран, 1990–2020 годы
Table 1. Indicators of international scientific cooperation for the top ten countries, 1990–2020

№ No.	Страна Country	Доля публикаций с международным соавторством, % Share of publications with the international co-authorship, %	
		КОИ QIP	Квантовая криптография Quantum cryptography
1	США USA	44,4	42,2
2	Китай China	23,7	17,5
3	Германия Germany	66,7	61,4
4	Великобритания Great Britain	63,4	58,7
5	Япония Japan	41,5	36,3
6	Канада Canada	67,5	69,6
7	Италия Italy	55,1	54,4
8	Франция France	63,7	64,1
9	Австралия Australia	64,7	66,4
10	Россия Russia	43,4	25,4

ное «ядро» сети международных соавторских связей в КОИ в 2000–2017 годах [22]. Международное соавторство играло важную роль и для повышения видимости отечественных КОИ-публикаций; так, по нашим расчетам, из 168 российских публикаций за 2000–2019 годы, вошедших в состав 10% наиболее цитируемых, ~92% имели соавторов из других стран. Таким образом, разрушение внешних научных связей из-за введенных санкций может негативно повлиять на продуктивность и качество российских исследований. Коль скоро нам предстоит вынужденная автономизация исследований, рассмотрим подробнее их внутреннюю организацию и структуру.

Внутрироссийский исследовательский ландшафт в области КОИ

Согласно табл. 2, основными отечественными участниками исследований являются НИИ РАН, университеты, а также РКЦ. Хотя в 2014 годы университеты обошли РАН по совокупному публикационному вкладу в области КОИ, это было достигнуто преимущественно за счет международных и внутренних межсекторальных соавторских связей; собственный вклад университетов при этом снизился с 50% в 1993–2006 годах до 25% в 2007–2020 годах. Кроме того, КОИ-публикации с участием РАН в среднем более цитируемы, чем те, в которых участвуют университеты (табл. 2, столбец 5). То есть в КОИ отечественный университетский сектор пока не стал самостоятельным драйвером исследований, как предполагалось университетско-центристской политикой, проводимой с 2006 года. 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,

Таблица 2. Наиболее продуктивные в КОИ российские организации
Table 2. The most productive Russian organizations in the field of QIP

№ No.	Институт / организация Institute/entity	Количество публикаций Number of publications	Количество публикаций, вошедших в мировой Топ-10% сегмент Number of publications included in the global top 10% segment	Пропорция публикаций, вошедших в мировой Топ-10% сегмент, % Proportion of publications included in the global top 10% segment, %
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	1 947	71	3,6
	РАН	1 661	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).

QIP publications and more has a concentration range of 65–75%. Canada and Germany are among the top ten countries (Table 1). Australia and other European countries demonstrate a somewhat lower, but quite high rate of cooperation. The USA, Russia and Japan cooperate with other countries to a relatively moderate extent; China is the most self-sufficient country. It is interesting that the greater confidentiality of cryptography papers is not accompanied by a decrease in international scientific cooperation for all countries; however, in the cases of Russia and China, such a decrease seems significant (Table 1).

These data show that the rapid research development in the field of QIP was accompanied by an increasing share of new scientific knowledge at the international



процитированных более 100, две – более 1000 раз; выходя из этого института А.Ю. Китаеву принадлежит самая цитируемая российская публикация, посвященная отказоустойчивым квантовым вычислениям с помощью энионов. Наследие советских времен – наукограды (даже без классических академгородков типа Новосибирского) внесли заметный вклад (~25%) в публикационный выход страны.

Публикационная активность крупных отечественных корпораций пока невелика: 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», не имеют публикаций. Наукоёмкий 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 меньше среднемирового показателя. Участниками примерно 1,5% российских публикаций были зарубежные корпорации.

России традиционно присуща высокая степень концентрации научного потенциала, особенно в появляющихся высокотехнологичных областях, что подтверждают табл. 3 и рис. 9. За весь период научные учреждения одной Москвы произвели более половины отечественных КОИ-публикаций. Согласно рис. 9, заметного тренда на географическую деконцентрацию исследований в области КОИ (как

Таблица 3. Российские города/наукограды с наибольшим количеством публикаций по КОИ

Table 3. Russian cities/technology cities with the largest number of publications in the field of QIP

№ No.	Город / наукоград City / technology city	Количество публикаций Number of publications	Доля публикаций, % Share of publications, %	Предпочтительная страна-партнер Preferred partner country
1	Москва Moscow	1608	52,3	Германия Germany
2	Санкт-Петербург (Ленинград) Saint-Petersburg (Leningrad)	525	17,1	США USA
3	Долгопрудный Dolgoprudniy	294	9,6	Германия Germany
4	Черноголовка Chernogolovka	273	8,9	Израиль Israel
5	Казань Kazan	238	7,7	США USA
6	Сколково Skolkovo	205	6,7	США USA
7	Новосибирск Novosibirsk	186	6,1	Германия Germany
8	Нижний Новгород Nizhniy Novgorod	89	2,9	США USA
9	Дубна Dubna	81	2,6	Швейцария Switzerland
10	Томск Tomsk	53	1,7	Германия Germany

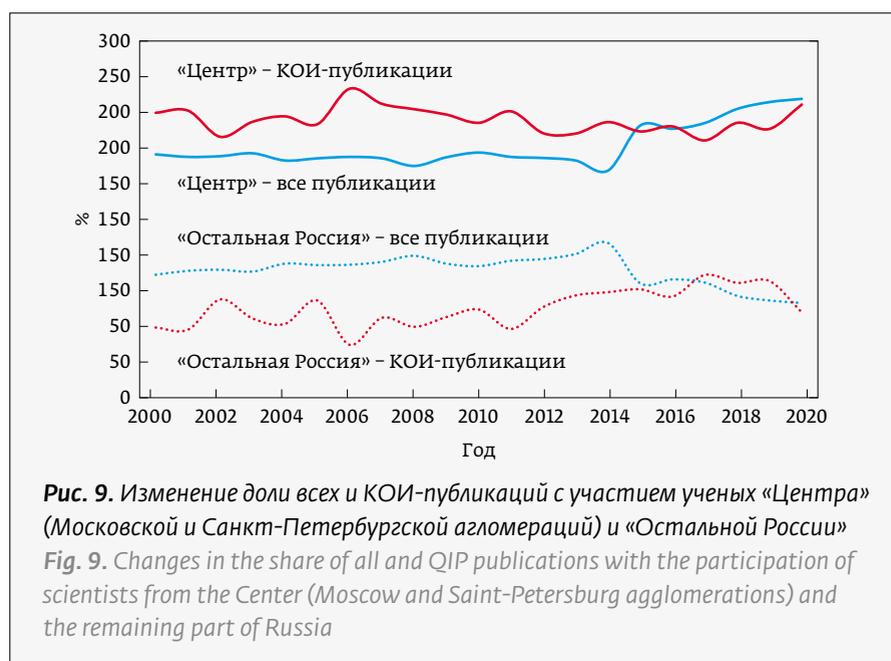


Рис. 9. Изменение доли всех и КОИ-публикаций с участием ученых «Центра» (Московской и Санкт-Петербургской агломераций) и «Остальной России»
Fig. 9. Changes in the share of all and QIP publications with the participation of scientists from the Center (Moscow and Saint-Petersburg agglomerations) and the remaining part of Russia



и в целом) не наблюдается: вклад «Центра», за небольшим исключением, колеблется между 70 и 80, а «Остальной России» – 20 и 30%. Для преодоления концентрации нужно активнее развивать научные связи «Центра» с «Остальной Россией», важную роль может также сыграть создаваемый в Сарове Национальный центр физики и математики, в научную повестку которого входят и квантовые технологии.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникнув в 1980-е годы как визионерская идея, профессионально заинтересовавшая лишь немногих ученых, в начале 1990-х гг. КОИ превратилась уже в отдельную широко признанную область научных исследований, для анализа развития которой может быть полезна библиометрия. Выполненный библиометрический анализ, в частности показал:

1. быстрый рост научной базы области, хотя высокая концентрация исследований на уровне ведущих стран и научных организаций мира говорит пока еще о ранней стадии ее развития. Тем не менее, большие экономические ожидания подтверждает участие в исследованиях крупных корпораций, особенно из Японии, а стремление получить в перспективе военно-стратегические преимущества – участие военно-исследовательских структур, в первую очередь, из США;
2. КОИ – область международного сотрудничества, поскольку для любой страны сложно продвигать квантовые технологии самостоятельно, особенно на ранней стадии развития. 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 году составила 27,5%. Отсюда политизация исследований, сопровождающаяся санкциями, мерами экспортного контроля и т.п., может серьезно затормозить их развитие. Около 29% российских КОИ-публикаций за 2016–2020 годы были выполнены в соавторстве с кем-либо из четверки ведущих западных стран: США, Германии, Великобритании, Франция. Разрыв этих связей нанесет ощутимый удар по отечественным исследованиям, а заместить их на восточном направлении будет непросто;

level. Unfortunately, the overall benefits of international scientific cooperation are increasingly being sacrificed to the political principles. The occurrence of quantum technologies coincided with the race between the USA and China for global technological supremacy, while the United States aims to maintain not just the relative advantages in key technologies, but the largest possible separation from the competitors. However, the Chinese obvious successes, especially in the field of quantum communications and cryptography (Fig. 8), are forcing the United States to resort to the sanctions policy. Under a different pretext, in 2022 the USA have already introduced unprecedented sanctions against the Russian science, including export control over the supply of special refrigerators, quantum software and cloud services to Russia. The similar export controls against China are currently being discussed. The “alignment” principle is also being enforced: thus, based on the geopolitical interests, the AUKUS alliance members (Australia, Great Britain, USA) entered into a quantum agreement to accelerate the quantum capabilities in the field of positioning and navigation. Obviously, this kind of activity cannot contribute to the overall research progress. The Russian movement in the world productivity ranking in the field of QIP is rather indicative: from the 7th place in 2000, it dropped to the 17th place by 2013, after which it began to develop and return to the top 10 countries in 2018. In 2020, it was inferior to France (9th place) in terms of only 15 publications. International scientific cooperation played a significant role in returning the country to the top ten. Over a 30-year period, Russia has had the cooperative relations with 65 countries, and the first seven countries in the list of its partners are the G7 members. Together with such countries, as well as Switzerland and Sweden, Russia was a part of the most cohesive “core” of the international co-authorship QIP connection network in 2000–2017 [22]. Moreover, the international co-authorship played an important role in increasing the visibility of domestic QIP publications. Thus, according to our calculations, 92% of the 168 Russian publications in 2000–2019 that were included in the 10% most cited ones, had the co-authors from other countries. Thus, the impairment of external scientific relations due to the imposed sanctions may negatively affect the productivity and quality of Russian research. Since we will soon be forced to get used to the research automation, let us consider their internal organization and structure in more detail.

Domestic Russian Research Landscape in the Field of QIP

According to Table 2, the main domestic participants in the research are the research institutes of the Russian



3. наряду с интернационализацией, есть еще ряд характерных для России черт в развитии исследований по КОИ:

- значительная концентрация исследований в «Центре», где расположены наиболее сильные отечественные НИИ, университеты и РКЦ;
- ведущая роль РАН, которая входит в первую десятку мировых организаций по продуктивности в области КОИ, а внутри страны превосходит университетский сектор по вкладу в мировой Топ-10% высоко цитируемых публикаций. Кроме того, ученые из РАН – (со)авторы самых высоко цитируемых (более 1000 ссылок) отечественных публикаций;
- на фоне активного собственного участия в исследованиях крупных зарубежных компаний отечественный корпоративно-коммерческий сектор представлен пока довольно слабо (возможно, в силу закрытости работ), что диссонирует с растущими ожиданиями глобальных коммерческих выгод от квантовых технологий.

Считается, что квантовые технологии будут столь же революционными в 21 веке, как использование электричества в 19 веке, но на вопрос, когда и как это произойдет, пока нет определенного ответа. На переднем крае новой квантовой революции – квантовые вычисления, обладающие потенциальной способностью экспоненциально увеличивать вычислительную мощность. Благодаря этому они обещают ускорить поток научных открытий и технологических инноваций во многих областях, в том числе через укрепление других технологий широкого применения, таких как искусственный интеллект. Однако сказанное относится к идеальным отказоустойчивым квантовым компьютерам (с миллионами кубитов), появление которых ожидается, не ранее чем через 10–15 лет. Доступные в настоящее время «шумные» квантовые компьютеры промежуточного масштаба (с десятками или сотнями кубитов) используются, в основном, для вычислительной поддержки при моделировании новых продуктов, материалов и лекарств. На их счету также две упомянутые демонстрации формального превосходства над классическими собратьями (в 2019 и 2020 года.). Однако в 2023 году компания IBM сообщила, что ее 127-кубитный «шумный» компьютер превзошел современные суперкомпьютеры при решении вполне практической задачи: моделирование динамики спинов электронов в материале для предсказания таких

Academy of Sciences, universities, as well as the RQC. Although in 2014 the universities surpassed the Russian Academy of Sciences in terms of total publication contributions in the field of QIP, this indicator was achieved primarily due to the international and domestic cross-sector co-authorship relations. Moreover, the universities' own contribution decreased from 50% in 1993–2006 to 25% in 2007–2020. In addition, the QIP publications with the participation of the Russian Academy of Sciences are on average more cited than those in which the universities participate (Table 2, column 5). Thus, the domestic university sector has not yet become an independent research driver in terms of the QIP, as expected by the university-centric policy pursued since 2006. It is possible to mention the Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences and ITMO as the efficient providers of highly cited publications. However, the largest proportion of such publications (15.1%) still belongs to the Landau Institute of Theoretical Physics of the Russian Academy of Sciences. Its employees (including those working abroad) published 13 articles, cited more than 100 times, while two of them were cited more than 1000 times. A graduate of this institute, A. Yu. Kitaev, has the most cited Russian publication dedicated to the fault-tolerant quantum computations with the help of anyons. The legacy of Soviet times, namely the technology cities (even without the typical academic cities like Novosibirsk), has made a significant contribution (~25%) to the country's publication output.

The publication activity of the large-scale domestic corporations is still rather low: 53 publications in the field of QIP were prepared by Rosatom (mainly by the Federal State Unitary Enterprise “Dukhov All-Russian Research Institute of Automation”), 2 – by the Russian Railways. Such specialized companies as Yandex, Sber, Mail.ru, or Kaspersky Lab, do not have any publications. The knowledge-intensive commercial sector in the field of QIP is still being formed for the account of young startups (QRate, Quanttelecom LLC, QAPP, DEPHAN, etc.), being established mainly in the RQC. In general, the contribution of the country's corporate commercial sector amounted to about 3.4% of all domestic publications that is less than the world average. Foreign corporations were the members in approximately 1.5% of the Russian publications.

Russia has conventionally been specified by a high degree of concentration of scientific potential, especially in the emerging high-tech areas that is confirmed by Table 3 and Fig. 9. Over the entire period of time, the scientific institutions in Moscow alone prepared more than the half of domestic QIP publications. According to Fig. 9, there is no noticeable



его свойств, как намагниченность [12]. Этот результат ставит вопрос о возможном достижении полезного «квантового превосходства» еще в эпоху «шумных» квантовых компьютеров до того, как будут реализованы полностью отказоустойчивые квантовые вычисления. Как бы то ни было, еще предстоит провести значительный объем исследований и экспериментов, чтобы реализовать весь потенциал квантовых вычислений. Несколько незаслуженно в тени квантовых вычислений находятся квантовое зондирование и связь, которые являются технологически более зрелыми и уже предлагают коммерчески доступные устройства, такие как магнитометры или устройства квантового распределения ключей [23]. Однако и здесь еще много сугубо исследовательских тем: многокубитные датчики с расширенными возможностями, квантовые повторители, многостороннее квантовое разделение секрета и т.д. То есть квантовые технологии второй волны все еще область исследований, для анализа динамики и структуры которой была бы и в дальнейшем полезна библиометрия, опирающаяся на более широкий набор актуализированных данных. К сожалению, настоящий анализ является для России своеобразной фиксацией статус-кво накануне ее отключения от мировых БД WCC и SCO.

REFERENCES

1. Editorial. 40 years of quantum computing. *Nature Reviews Physics*. 2022; 4(1). <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00410-6>.
2. Feynman R. P. Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*. 1982; 21(6/7): 467–488.
3. Nil'sen M., Chang I. *Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya*. – М.: Mir. 2006. 824 p. (In Russ.)
Нильсен М., Чанг И. *Квантовые вычисления и квантовая информация*. – М.: Мир. 2006. 824 с.
4. *Quantum Information Science. An Emerging Field of Interdisciplinary Research and Education in Science and Engineering*. Report of the NSF Workshop. US, Virginia. 1999. URL: <https://www.nsf.gov/pubs/2000/nsf00101/nsf00101.pdf>.
5. DiVincenzo, D. P. The physical implementation of quantum computation. *Fortschritte der Physik – Progress of Physics*. 2000; 48(9–11): 771–783. [https://doi.org/10.1002/1521-3978\(200009\)48:9/113.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1521-3978(200009)48:9/113.0.CO;2-E).
6. Montanaro A. Quantum algorithms: an overview. *npj Quantum Information*. 2016; 2: Article number 15023. <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23>.
7. Bova F., Goldfarb A., Melko R. G. Commercial applications of quantum computing. *EPJ Quantum Technology*. 2021; 8(2): 13 p. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1>.
8. *Kvantovye tekhnologii dlya gosudarstva i biznesa: nastoyashchee i budushchee*. – М.: Fond Roskongress. 2023. 28 p.
Квантовые технологии для государства и бизнеса: настоящее и будущее. – М.: Фонд Росконгресс. 2023. 28 с.
9. Najafi K., Yelin S. F., Gao X. The Development of Quantum Machine Learning. *Harvard Data Science Review*. 2022; 4(1): 1–13.
10. Krelina M. Quantum technology for military applications. *EPJ Quantum Technology*. 2021; 8(1): Article number 24. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y>.
11. Groenland K. The professional's guide to Quantum Technology. Part 5 – Timelines: When can we expect a useful Quantum Computer? 12 May 2023. URL: <https://www.quantum.amsterdam/part-5-when-can-we-expect-a-useful-quantum-computer-a-closer-look-at-timelines/>.
12. Choi C. Q. IBM: Quantum computers are already doing heavy lifting. 22 Jun 2023.

trend toward the geographic deconcentration of QIP research (as in general): the Center's contribution, with a few exceptions, fluctuates between 70 and 80, and the remaining part of Russia – 20 and 30%. To overcome concentration, it is necessary to more actively develop the scientific relations of the Center with the remaining part of Russia; the National Center for Physics and Mathematics being established in Sarov which scientific agenda includes the quantum technologies can also play an important role.

FINDINGS AND CONCLUSION

Having emerged in the 1980s as a visionary idea that interested only a few scientists on a professional level, in the early 1990s, the QIPs have already become a separate and widely recognized area of scientific research, for the developmental analysis of which the bibliometrics can be applied. The bibliometric analysis performed, in particular, demonstrated as follows:

1. rapid growth of the regional scientific base, although the high research concentration at the level of leading countries and global scientific institutions still indicates an early stage of its development. However, the high economic expectations are confirmed by the participation of large-scale corporations in the research activities, especially from Japan, and the desire to gain the military and strategic advantages in the future is confirmed by the participation of military research entities, primarily from the USA;
2. The QIP is an area of international cooperation, since it is difficult for any country to advance the quantum technologies independently, especially at an early stage of development. Thus, more than one third of global publications in 2020 were prepared by the international teams of scientists. Even in such a sensitive subfield as the quantum cryptography, the share of such publications in 2020 was 27.5%. Hence, the politicization of research, accompanied by the sanctions, export control measures, etc., can seriously hinder its development. About 29% of the Russian QIP publications in 2016–2020 were co-authored by one of the four leading Western countries, namely the USA, Germany, Great Britain, and France. The breaking of such bonds will get in a significant strike to the domestic research, moreover, their replacement in the eastern direction will not be easy;
3. along with the internationalization, there are a number of features typical for Russia in the development of the QIP research:



URL: <https://spectrum.ieee.org/practical-quantum-computing-ibm>.

13. *Poslanie Prezidenta RF Federal'nomu Sobraniyu ot 01.12.2016*. Moskva. 01.12.2016. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207978/. (In Russ.)
Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 01.12.2016. Москва. 01.12.2016. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207978/.
14. **Fedorov A. K.** Kvantovye tekhnologii: ot nauchnykh otkrytij k novym prilozheniyam. *Fotonika*. 2019; 13(6): 574–583. DOI: 10.22184/1993-7296. FRos.2019.13.6.574.583. (In Russ.)
Федоров А. К. Квантовые технологии: от научных открытий к новым приложениям. *Фотоника*. 2019; 13(6): 574–583. DOI: 10.22184/1993-7296. FRos.2019.13.6.574.583.
15. **Witt S.** The World-Changing Race to Develop the Quantum Computer. *The New Yorker. Annals of Technology*. 19 Dec 2022. URL: <https://www.newyorker.com/magazine/2022/12/19/the-world-changing-race-to-develop-the-quantum-computer>.
16. **Cartwright J.** NSA keys into quantum computing. 06 Feb 2014. URL: <https://physicsworld.com/a/nsa-keys-into-quantum-computing/>.
17. **Wang J., Shen L., Zhou W.** A bibliometric analysis of quantum computing literature: mapping and evidences from Scopus. *Technology Analysis & Strategic Management*. 2021; 33(11): 1347–1363. DOI: 10.1080/09537325.2021.1963429.
18. **Scheidstege T., Haunschild R., Bornmann L., Christoph E.** Bibliometric analysis in the field of quantum technology. *Quantum Reports*. 2021; 3(3): 549–575. <https://doi.org/10.3390/quantum3030036>.
19. **Terekhov A. I.** Kvantovaya obrabotka informacii: bibliometricheskij vzglyad. *Priladnaya informatika*. 2019; 14(3): 55–65. DOI: 10.24411/19938314201910015. (In Russ.)
Терехов А. И. Квантовая обработка информации: библиометрический взгляд. *Прикладная информатика*. 2019; 14(3): 55–65. DOI: 10.24411/19938314201910015.
20. **Bhushan B.** Introduction to Nanotechnology. In: *Springer Handbook of Nanotechnology*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. P. 1–19.
21. **Editorial.** Quantum nanoscience. *Nature Nanotechnology*. 2021; 16: 1293. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-01058-0>.
22. **Terekhov A. I.** Pozicionirovanie Rossii v povavlyayushchihsya vysokotekhnologichnykh napravleniyah. *Vestnik RAN*. 2022; 92(1): 74–85. DOI: 10.31857/S0869587322010091. (In Russ.)

- significant concentration of research in the Center, where the most powerful domestic research institutes, universities and RQC are located;
- the leading role of the Russian Academy of Sciences that is among the top ten global institutions in terms of the QIP area productivity, and within the country surpasses the university sector in its contribution to the global top 10% of the highly cited publications. In addition, the cu-authors, being the scientists from the Russian Academy of Sciences are second to the most highly cited (more than 1000 references) domestic publications;
- against the background of active participation of the large-scale foreign companies in the research activities, the domestic corporate and commercial sector is still rather poorly represented (perhaps due to the closed nature of papers) that is discordant with the growing expectations of global commercial benefits from the quantum technologies.

It is believed that the quantum technology will be as revolutionary in the 21st century as the use of

ОАО «ММЗ имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»



Оптический завод «Сфера»

«Оптический завод «Сфера» основан в 1994 году как филиал ОАО «Минский механический завод имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга БелОМО» для производства оптических элементов. В настоящее время завод выпускает большое количество оптических элементов различной сложности по чертежам Заказчика. Оптические элементы, произведенные «Оптическим заводом «Сфера», успешно применяются во многих уникальных оптоэлектронных системах.

Для производства высокотехнологичной продукции проводится техническое переоснащение производства, проводится модернизация производственных мощностей с целью увеличения объемов производства. Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям версии ГОСТ ISO 9001:2015.

Многолетний опыт производства оптических элементов, высококвалифицированный персонал предприятия позволяют удовлетворить любую потребность Заказчика.

Республика Беларусь, 220114,
г. Минск, ул. Макаенка, 23
Тел.: (+375 17) 325-52-91
Тел./факс: (+375 17) 276-27-71
E-mail: sfera.ved@belomo.by; sfera@belomo.by

www.belomo.by





Терехов А. И. Positionирование России в появляющихся высокотехнологичных направлениях. *Вестник РАН*. 2022; 92(1): 74–85. DOI: 10.31857/S0869587322010091.

23. The quantum state of affairs. *Nature Physics*. 2023; 19: 605. <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02072-w>.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ключевые термины, использованные при поиске, охватывали:

- **КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ И ВЫЧИСЛЕНИЯ:**
а) *quantum hardware*: qubit, quantum gate, quantum register, quantum bus, quantum chip, quantum circuit, quantum integrate circuit, quantum memory, quantum RAM, quantum processor, quantum device, quantum computer, quantum-mechanical computer, quantum NISQ computer, quantum* supercomputer, quantum computing, quantum parallel computing, quantum server и др.; б) *quantum software*: quantum language, quantum program, quantum algorithm, quantum-inspired algorithm, quantum annealing, quantum optimization, Shor's algorithm, 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 correction, quantum cryptography, 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, и др.;
- **КВАНТОВУЮ МЕТРОЛОГИЮ И ЗОНДИРОВАНИЕ:** quantum metrology, quantum precision measurement, quantum sensor, quantum sensing, quantum detector, quantum detecting, quantum magnetometer, quantum gyroscope, quantum accelerometer, quantum clock, quantum radar и др.

АВТОР

Терехов Александр Иванович, к. ф.- м. н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН), Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-0266-1606.

electricity was in the 19th century. However, there is no definite answer to the question of when and how this will happen. The quantum computations are at the forefront of the new quantum revolution having the potential to exponentially increase the computing power. Due to this fact, they promise to accelerate the flow of scientific discoveries and technological innovations in many areas, including by strengthening other general-purpose technologies such as artificial intelligence. However, the above facts are applied to the perfect fault-tolerant quantum computers (with the millions of qubits), occurrence of which is expected no earlier than 10–15 years later. The currently available intermediate-scale «noisy» quantum computers (with the tens or hundreds of qubits) are used primarily for computational support during the simulation of new products, materials, and pharmaceutical drugs. Moreover, they are distinguished by two above-mentioned demonstrations of formal superiority over their typical counterparts (in 2019 and 2020). However, in 2023, IBM reported that its 127-qubit “noisy” computer outperformed the modern supercomputers at solving a very practical issue: simulation of the electron spin dynamics in the material to predict its properties such as magnetization [12]. This result raises the question of whether it is possible to achieve the efficient «quantum supremacy» even in the era of «noisy» quantum computers, before the completely fault-tolerant quantum computations are implemented. However, a significant scope of research and experimentation remains to be performed to implement the full potential of quantum computations. The quantum probing and communications are somewhat undeservedly overshadowed by the quantum computations while being technologically more mature. They already offer the commercially available devices such as magnetometers or quantum key distribution devices [23]. However, there are still many purely research topics in this case: the multi-qubit sensors with advanced capabilities, quantum repeaters, multilateral quantum secret sharing, etc. That is, the second wave quantum technologies still represent an area of research, for the dynamics and structure analysis of which the bibliometrics would continue to be useful, based on a wider set of updated data. Unfortunately, this analysis is a kind of the status quo registration for Russia on the eve of its disconnection from the world WCC and SCO databases.

AUTHOR

Terekhov Aleksander Ivanovich, Ph.D. in physical and mathematical science, leading researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-0266-1606 .

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ
МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

ARMY

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ «АРМИЯ-2024»**

**12–18 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

www.rusarmyexpo.ru