

ДОКУМЕНТАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК [002:001.893]: [004:539.1]

А.И. Терехов

Библиометрические тенденции в квантовой обработке информации

Представлены результаты библиометрического анализа исследований по квантовой обработке информации за 2000-2017 гг. В качестве источника данных использован Science Citation Index Expanded (SCIE). Выявлены страны со значимыми объемами проводимых исследований, а также основные участники "квантовой гонки". В терминах анализа социальных сетей с применением индекса Солтона изучена структура соавторской сети; при анализе цитирования использованы показатели, основанные на подсчете не только среднего числа ссылок на публикацию, но и высокоцитируемых публикаций в сегментах топ-1% и топ-10%. Выявлены источники и структура спонсорской поддержки публикуемых результатов в области квантовой обработки информации. Позиции России оценены по всем рассмотренным показателям.

Ключевые слова: квантовая обработка информации, данные Science Citation Index Expanded, библиометрический анализ, соавторская сеть, цитирование, спонсорская поддержка

DOI: 10.36535/0548-0019-2020-04-5

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы квантовые компьютеры неизменно попадают в топ-списки многообещающих глобальных технологий (например, [1, 2]). Иногда по значимости квантовые компьютеры ставят даже выше находящегося на пике популярности искусственного интеллекта [3]; как бы то ни было, они способны и здесь внести свой весомый вклад. Возникшая около 40 лет назад идея объединения квантовой механики с классической машиной Тьюринга [4] в начале 2000-х гг. обрела черты практической достижимости, что положило начало мировой гонке за "квантовое будущее". По оценке участников семинара [5] фундаментальные исследования играют ключевую роль в развитии квантовых технологий, поэтому анализ их структуры и динамики представляет интерес. Такой анализ полезен для детализации общей динамики и роли российских исследований публикационной активности [6], особенно на передовых направлениях науки.

Предварительно отметим: квантовые компьютеры и вычисления тематически вплетены в более широкую научно-технологическую область – квантовую обработку информации (КОИ), куда входят также

квантовая связь и квантовая метрология¹, поэтому КОИ целесообразно анализировать как единое целое. Для изучения развития наукоемкой области, при всех существующих оговорках (см. [6]), часто применяют библиометрию. Однако в силу различных интересов не все результаты исследований в области КОИ попадают в открытую печать. Учитывая это, тем не менее, есть основания рассмотреть процессы формирования научной основы КОИ через призму библиографических баз данных, в частности, наиболее авторитетной в мире политематической базы данных Science Citation Index Expanded (БД SCIE). С использованием этой БД в настоящей статье выполнен библиометрический анализ развития КОИ в период 2000-2017 гг., в центре внимания которого основные участники исследований, международная научная кооперация и цитируемость публикаций.

¹ Создание квантовозащищенной связи (с помощью квантовой криптографии) относят к факторам особой важности для национальной безопасности; продукты же квантовой метрологии (например, датчики, усовершенствованные с помощью квантовой информатики) считают ближайшими кандидатами к выводу на рынок [7].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Выборка публикаций формировалась в два этапа. Сначала в БД SCIE были выделены 4 тематические журнала: "Quantum Information & Computation" (США), "Quantum Information Processing" (США), "International Journal of Quantum Information" (США), "npj Quantum Information" (Великобритания), публикации которых включены в выборку полностью. Далее, по содержанию этих журналов (просматривались названия и аннотации статей) сформирован набор поисковых ключевых терминов, который после тестирования в БД и экспертной корректировки включал 85 терминов, тематически охватывающих квантовые компьютеры и вычисления, связь и криптографию, зондирование и метрологию. Применение такой комбинированной процедуры позволило за рассматриваемый период извлечь из БД SCIE около 47,7 тыс. релевантных публикаций (*article, review, proceedings paper, letter*), составивших исходную выборку для настоящего анализа.

ОСНОВНЫЕ УЧАСТНИКИ МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно БД SCIE, квантовая обработка информации относится к достаточно, однако не экстремально, быстро растущим научным областям: среднегодовой темп роста публикаций по этой теме за последние 9 лет составил 6,4% против 4,0% – для всех публикаций; 9,0% – для нанопубликаций и 11,6% – для углеродных наноструктур. Хотя бы одну работу в области КОИ за рассматриваемый период опубликовали 110 стран, 46 из них – более ста работ (Приложение 1). Географически в эту группу входят: 24 страны из Европы, включая Россию и 19 представителей Европейского Союза (ЕС); 11 стран из Азии; по три страны из Северной Америки и Южной Америки, а также из Африки; две страны из Австралии и

Океании. На рис. 1 виден стремительный прогресс Китая, который уже в 2008 г., обогнав США, вышел на 1-е место по публикационной активности в этой области. Ведомый Китаем БРИКС пока не догнал группу стран G7 (Великобритания, Германия, Италия, Канада, США, Франция, Япония), как это произошло, например, в таком перспективном ответвлении нанотехнологий, как нанофотоника [8]. Вклад России в мировой публикационный выход за 2000–2017 гг. составил 3,3%; его повышение на конец периода до 3,8% не позволило ей, однако, войти в Топ 10 стран по продуктивности.

Вхождение всех членов G7 в первую десятку стран по масштабам исследований, с одной стороны, показывает значительный интерес к КОИ промышленно развитых лидеров мира, а с другой, – подчеркивает высокий уровень требований к исследовательским возможностям. Тем не менее, ситуация не статична. Для иллюстрации выделим в массиве публикаций те, которые выполнены только странами G7, только странами "остального мира" (исключая G7) и при сотрудничестве стран из G7 и "остального мира" (смешанные коллаборации). Рис. 2 показывает, что в начале периода исследования концентрировались преимущественно внутри группы G7, а основная динамика в первом полупериоде состояла в интенсивном перераспределении долей от G7 к "остальному миру"; после того как доля последнего установилась в районе 46-50%, двигателем изменений во втором полупериоде стало перекрестное сотрудничество между двумя группами. К концу периода доля работ, выполненных смешанными коллаборациями, составила 45,2% от публикационного выхода группы G7 и 31,5% – "остального мира". Приведенный пример наглядно демонстрирует глобализацию исследований и рост перекрестного сотрудничества в области КОИ, однако из-за высокой агрегированности не позволяет пока сделать более конкретных выводов.

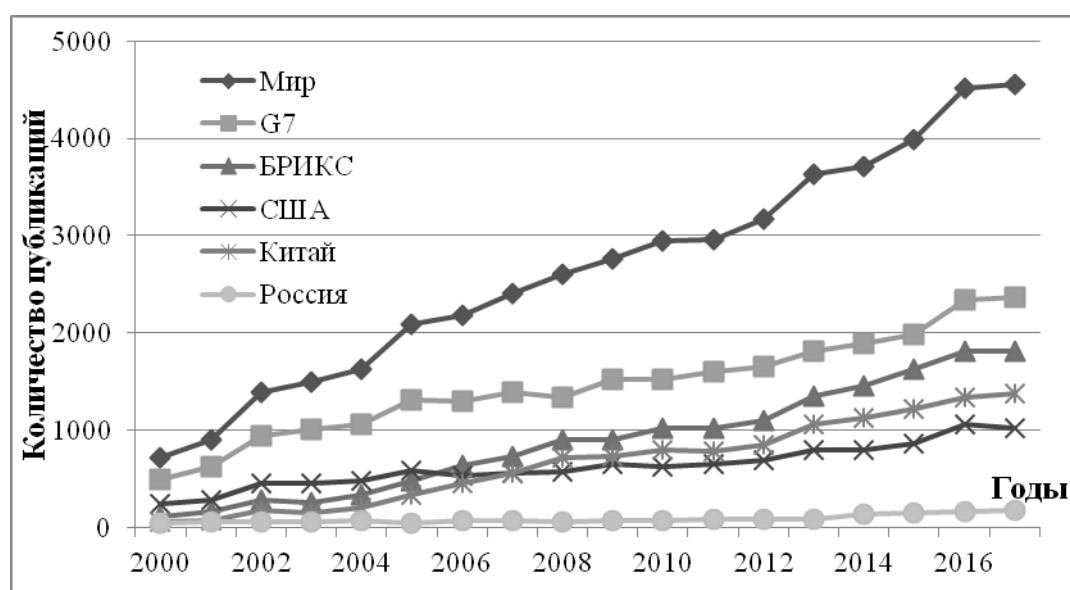


Рис. 1. Динамика публикационной активности в области квантовой обработки информации: мира, отдельных стран и их групп

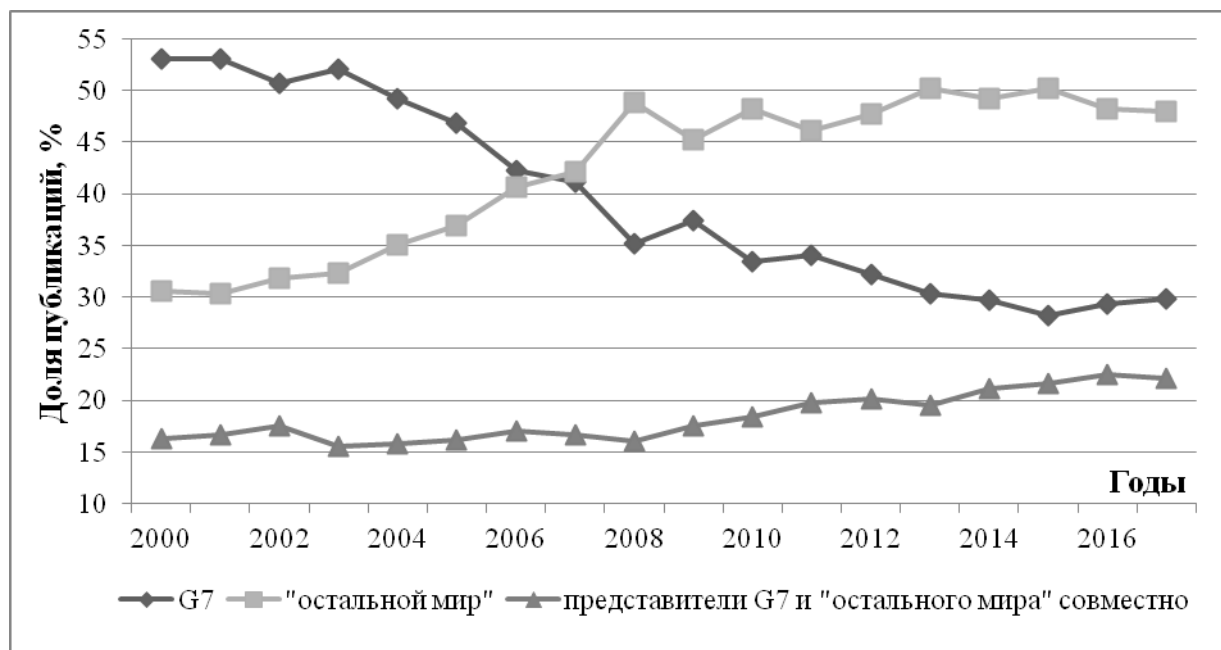


Рис. 2. Изменение публикационного вклада выделенных групп стран

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО (СОВАВТОРСТВО)

Характерная черта современной науки – международное сотрудничество. Согласно [9], доля научных публикаций с международным соавторством за 20 лет более чем удвоилась и составляет к настоящему моменту около 25%. Международные соавторские сети становятся важным фактором организации исследований, расширяющим и дополняющим национальные системы, что повышает интерес к их изучению.

Выполненные расчеты показали, что, несмотря, казалось бы, на повышенную конфиденциальность, для исследований в области КОИ характерна интенсивная международная кооперация. Так, 31,4% всех публикаций имели международное соавторство, причем доля таких публикаций выросла за рассматриваемый период с 25,7% в 2000 г. до 28,6% в 2008 г. и до 34,7% в 2017 г. Доля публикаций с международным соавторством в группе 46 стран варьируется достаточно сильно: от 19,6% у Ирана до 89,1% у Саудовской Аравии (см. Приложение). Медианное значение этого показателя в группе составляет 64,3%. Интересно, что большинство европейских стран (16 из 24) попало в верхнюю, а большинство азиатских (9 из 11) – в нижнюю части разбиения. Доля международно-соавторских публикаций у лидеров (Китая и США), а также России ниже медианного значения, однако, если у США и России она составляет примерно 48%, то у Китая близка к нижнему пределу (~22%).

Охарактеризуем сеть соавторских связей 46 стран, обладающую достаточно высокой плотностью: ~76%. Максимальную близость к центру разбиения (=1) в этой сети имеют США, Италия и Япония. Далее следуют Германия, Великобритания и Канада (0,98), Франция и Испания (0,96); минимальную – (0,29) Марокко. Показатель России – 0,89. Нормированная

центральность по степени близости к центру всей сети – 0,25 – свидетельствует о том, что сеть слабо централизована. Чтобы продолжить анализ структуры сети, учтем силу соавторских связей, для измерения которой используем индекс Солтона – IS^2 . Согласно расчетам, наиболее сильные соавторские связи были у Египта и Саудовской Аравии ($IS=0,371$), Чехии и Словакии (0,187), США и Канады (0,149), Египта и Малайзии (0,127), Великобритании и Сингапура (0,122), Германии и Испании (0,119), Германии и Австрии (0,117), Германии и Великобритании (0,109), Саудовской Аравии и Марокко (0,109), Великобритании и Италии (0,105). Остальные значения IS не превышают 0,1. Можно заметить, что за тремя самыми сильными для данной сети связями стоит фактор "географического соседства". Разобьем совокупность соавтор-

² Индекс Солтона как показатель силы сотрудничества.

Довольно естественно, что у стран с большим публикационным выходом больше шансов и на сотрудничество; однако сотрудничество между менее продуктивными странами также может быть важным для одного или обоих партнеров. Чтобы учесть это, требуется показатель силы кооперационных связей между парами стран, который нормализован относительно объемов публикаций обоих партнеров. Таким показателем может служить индекс Солтона (IS), который впервые в библиометрической практике предложен в [10], впоследствии же стал активно применяться при анализе сетей международного соавторства [11, 12]. IS для пары стран рассчитывается путем деления числа их соавторских публикаций на среднее геометрическое чисел всех публикаций каждого из партнеров; т. е. это – не имеющий размерности показатель силы сотрудничества. Согласно определению, IS варьируется от 0 (если у пары стран нет соавторских публикаций) до 1 (если все публикации обеих стран являются соавторскими). На практике же его значения обычно находятся в диапазоне от 0 до 0,1 для большинства пар стран.

ских связей, согласно значению IS, на четыре примерно равные части с помощью квартилей. Обозначим через S_1 – нижнюю часть разбиения (с наименьшими значениями IS). Далее, по порядку: S_2 – вторую, S_3 – третью и, наконец, S_4 – верхнюю (с наибольшими значениями IS) части. Заметим, что 45 стран, исключая Турцию, имеют хотя бы одну соавторскую связь из S_4 ($IS \geq 0,02$). Десять стран (члены G7, а также Россия, Швейцария и Швеция) образуют в S_4 наибольшую клику³, т.е. представляют подгруппу стран с внутренне устойчивыми связями соавторства в рассматриваемой научной области. Заменяв в этой подгруппе Россию на Сингапур или Нидерланды, получаем две другие наибольшие клики в S_4 . Дальнейший анализ структуры международной сети, в частности, показал:

1) высокая плотность (90,6%) характеризует соавторские связи 19 стран ЕС. Среди них выделяется группа стран (Германия, Великобритания, Италия, Франция, Испания, Польша, Австрия, Нидерланды, Швеция, Дания, Бельгия) с сильными связями, которые на 89% принадлежат S_4 и на 11% – S_3 . К этой группе стран довольно тесно примыкают Чешская Республика и Венгрия, а из стран, не входящих в ЕС, – Швейцария. Наиболее слабо интегрированы в соавторскую подсеть стран – членов ЕС Румыния, Португалия и Ирландия;

2) для азиатских стран, включая Египет (который частично находится в Азии), характерно преобладание более слабых внутригрупповых связей соавторства: 65% из них принадлежат $S_1 \cup S_2$. Однако и здесь можно выделить две устойчиво связанные подгруппы стран (клики размера 4 и 3, соответственно, со связями в S_4): Китай – Япония – Сингапур – Южная Корея и Египет – Саудовская Аравия – Малайзия. По силе перекрестных соавторских связей (например, с 11-ю выделенными странами ЕС, США и Канадой – см. п. 1) азиатские страны делятся на две подгруппы: {Китай, Япония, Индия, Сингапур, Южная Корея, Израиль} и {Иран, Тайвань, Египет, Саудовская Аравия, Пакистан, Малайзия}. У первой группы преобладают более сильные перекрестные связи (на 85% из $S_4 \cup S_3$), у второй – более слабые (на 68% из $S_1 \cup S_2$). Наиболее тесно с выделенной группой западных стран сотрудничают Сингапур и Япония, наименее тесно – Пакистан и Малайзия. Добавим, что Сингапур и Япония представляют Азию в наибольшей клике (размера 10) в S_4 ;

3) конкретные примеры сочетания локальных (местных) и глобальных соавторских связей в $S_4 \cup S_3$ дают скандинавский (Швеция – Финляндия – Норвегия) и азиатский (Египет – Саудовская Аравия – Малайзия) "треугольники", латиноамериканский (Бразилия – Мексика – Аргентина – Чили) "четырёхугольник". Первый из "треугольников" входит в максимальную клику размера 9, включающую также США, Германию, Испанию, Россию, Польшу и Данию, второй – в максимальную клику размера 5 вместе с Марокко и Италией. Латиноамериканский "четырёхугольник" входит в максимальную клику размера 9 вместе с Испанией,

США, Германией, Италией и Францией. В свою очередь, Новая Зеландия вместе со своим географическим соседом – Австралией – входят в максимальную клику размера 7 в $S_4 \cup S_3$, включающую также Норвегию, США, Германию, Россию и Данию. Довольно сплоченную группу (клику в $S_4 \cup S_3$) образуют 4 страны бывшего социалистического лагеря: Польша, Венгрия, Чехия и Словакия. Однако расширению этой группы за счет России, Украины и Румынии мешают слабые связи России с Чехией, а Польши с Украиной и Румынией. Данная клика входит в максимальную клику размера 12 вместе с США, Германией, Великобританией, Японией, Францией, Швейцарией, Австрией и Данией. Экономическое сотрудничество партнеров по БРИКС пока не привело к заметному усилению их научной кооперации на примере квантовой обработки информации: хотя члены блока и имеют соавторские связи друг с другом, эти связи еще достаточно слабы (входят в S_2);

4) согласно индексу Солтона, в число наиболее предпочтительных партнеров для России входят Германия, США, Франция, а также Норвегия и Украина. Заметим, что у двух последних стран с относительно небольшим количеством публикаций Россия в порядке партнерских предпочтений на 1-м и 2-м местах, соответственно. Это обстоятельство может свидетельствовать о высокой обоюдной склонности к сотрудничеству. У остальных стран, кроме Новой Зеландии, Россия не входит в пятерку предпочтительных партнеров.

Таким образом, международную соавторскую сеть в области КОИ характеризует наличие наиболее сплоченной группы развитых стран (членов G7, Швейцарии и Швеции), к сотрудничеству с которыми стремятся многие другие страны. Вхождение России, совместно с этой группой, в наибольшую клику в S_4 косвенно свидетельствует о достаточно высоком уровне ее исследований. Напротив, члены БРИКС, хотя и образуют клику, пока еще слабо сотрудничают друг с другом. Европейские страны, за некоторым исключением, демонстрируют значительно большую внутреннюю сплоченность, чем азиатские, часть из которых сильнее тяготеет к сотрудничеству с западными партнерами. Отметим, что подобный анализ с применением сетевых инструментов помогает глубже понять структуру научного сотрудничества и мог бы быть продолжен, в том числе и путем перехода на уровень научных организаций.

Другой важной стороной международной кооперации является интернационализация финансирования исследований⁴. Согласно данным БД SCIE, свыше тысячи финансирующих организаций (или научных программ) разных стран упомянуты в ссылках на спонсорскую поддержку в публикациях по КОИ за 2008-2017 гг. Наиболее активные из этих ор-

³ клика – термин теории графов. Здесь означает подмножество стран, любые две из которых имеют соавторские связи.

⁴ С августа 2008 г. в базы данных WOS, в первую очередь в БД SCIE, вводятся на регулярной основе указания на спонсорскую поддержку, содержащиеся в публикациях. Накапливаемая с тех пор информация открывает возможности для анализа структуры финансирования той или иной научной области, увязки научного входа и выхода, расширяя тем самым рамки традиционной библиометрии.

ганизаций (табл. 1) представляют собой научные фонды, исследовательские советы, государственные и международные программы, военные и разведывательные агентства. Вместе они отражают многообразие интересов коллективного мирового "заказчика" исследований в области КОИ. Американские финансирующие организации совокупно поддержали публикации, (со)авторами которых были ученые, более чем из 60 стран. Для китайских и российских финансирующих организаций количество поддерживаемых стран было несколько меньшим: 48 и 42, соответственно. В большинстве случаев международная спонсорская поддержка публикаций сопровождается присутствием в составе их авторов хотя бы одного ученого из спонсирующей страны. Примечательно, однако, что в области квантовой обработки информации США (даже в лице своих военных и разведывательных агентств) поддерживают, причем в заметном количестве (около 13% случаев), чисто иностранные авторские коллективы. Для сравнения: уровень аналогичной поддержки со стороны Китая не превысил 1%, а российские финансирующие организации практически не поддерживали публикаций, среди (со)авторов которых отсутствовали бы россияне.

В агрегированной форме структура финансовой поддержки отечественных публикаций выглядит так: 39% из них были поддержаны только российскими, 14% только зарубежными финансирующими организациями, 25% – теми и другими совместно. Еще 22% публикаций не содержали указаний на спонсорскую поддержку (по причине ее отсутствия или "недос-

мотра" авторов). Уже эти сведения содержат некоторую характеристику публикаций. Например, в отношении третьей группы публикаций можно заметить: то, что соответствующее исследование еще на стадии проектной заявки прошло многостороннюю экспертизу, объективно добавляет им шанс быть процитированными. Вторая же группа публикаций примечательна тем, что среди их авторов с российской аффилиацией вероятно встретит ученых, уже слабо связанных с отечественной наукой и не участвующих в реальном сотрудничестве (указание же аффилиации может быть просто "припиской"). Источники финансирования российских исследований представлены в табл. 2. Основной спонсор – Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), однако размер его грантов оставался небольшим. Министерство образования и науки РФ финансирует довольно большое количество программ по поддержке науки, главные из которых – федеральные целевые программы, Российская академия наук ограничена в таких возможностях, да и практика ссылок на поддержку ее программ пока еще недостаточно укоренена. Хороший "вес" в поддержке квантовой обработки информации у Российского научного фонда (РНФ), начавшего свою грантовую деятельность только в 2014 г. Заметна поддержка российских исследований зарубежными спонсорами (преимущественно европейскими).

Таким образом, проведенный анализ показывает, что активное международное сотрудничество и софинансирование выступают характерной чертой развития исследований в области КОИ в их открытой части.

Таблица 1

Основные источники финансирования мировых публикаций по квантовой обработке информации, 2008-2017 гг.

Финансирующая организация	Страна	Доля поддержанных публикаций, %
Государственный фонд естественных наук	Китай	21,0
Национальный научный фонд США (ННФ США)	США	7,3
Европейские финансирующие организации (ЕФО)*	Европейский Союз	6,7
Управления научных исследований видов вооруженных сил США (сухопутных войск, ВВС, ВМС)	США	5,2
Исследовательский совет по инженерно-физическим наукам (ИСИФН)	Великобритания	4,4
Государственная программа развития фундаментальных исследований	Китай	4,3
Немецкое научно-исследовательское общество (ННИО)	Германия	3,1
Исследовательский совет Канады по естественным и инженерным наукам	Канада	3,0
Фонды фундаментальных исследований центральных университетов	Китай	2,3
Австралийский исследовательский совет	Австралия	1,9
Агентство передовых оборонных исследовательских проектов	США	1,7
Агентство передовых исследований в сфере разведки	США	1,4

* Это – зонтичное название, куда включены: *European Union* или *EU*, *European Commission* или *EC*, *European Research Council* или *ERC*, *EU FP6*, *EU FP7*, *Horizon 2020*, *EU Graphene Flagship* и др.

**Основные источники финансирования российских публикаций
по квантовой обработке информации, 2008-2017 гг.**

Финансирующая организация	Страна	Доля поддержанных публикаций, %
Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)	Россия	39,2
Министерство образования и науки РФ (МОН РФ)	Россия	16,8
Российский научный фонд (РНФ)	Россия	11,5
ЕФО	Европейский Союз	11,3
Российская академия наук (РАН)	Россия	6,7
ННИО	Германия	6,3
Фонд "Династия"	Россия	5,3
Военно-научные структуры США	США	4,3
ННФ США	США	4,1
ИСИФН	Великобритания	2,3

АНАЛИЗ ЦИТИРОВАНИЯ

Цитируемость часто используют в качестве косвенного показателя влияния исследования или даже его качества. Хотя это нередко оспаривается, все же существует согласие, что высокоцитируемые статьи, как правило, более ценны, чем статьи, цитируемые реже или не цитируемые вообще. Интерес ученых в области наукометрии, а также запрос со стороны финансирующих агентств и научных администраторов, наряду с появлением соответствующих баз данных, способствовали тому, что анализ цитирования получил широкое распространение при оценивании исследований [13]. В настоящем разделе попытаемся оценить научное влияние отдельных стран (их групп) и институтов в области квантовой обработки информации с помощью показателей, основанных на цитировании.

На момент проведения обследования (март 2019 г.) публикации из исходной выборки были процитированы более 1,35 млн раз. В табл. 3 (столбец 2) приведен вклад стран в общее количество цитат. Лидируют США, за ними с большим отрывом следуют Германия и Великобритания, причем последняя лишь незначительно опережает Китай. Вклад Китая и России в общее количество публикаций (25,2 и 3,3%, соответственно) превышает их вклад в общее количество цитат (13,4 и 2,5%, соответственно), что служит первым сигналом о слабом влиянии публикаций обеих стран. Детализацию картины обеспечивает относительный показатель цитирования (ОПЦ)⁵, демонстрирующий среднюю цитируемость публикаций страны. Согласно рис. 3, публикации Китая и России (за исключением двух точек для последней) цитируются ниже среднемирового уровня, хотя в последние годы у обеих стран наметился определенный прогресс.

⁵ ОПЦ – относительный показатель цитирования рассчитывается путем деления средней цитируемости публикаций страны на среднюю цитируемость публикаций мира и показывает: выше или ниже среднемирового уровня (=1) цитируются публикации этой страны.

Путем сопоставления соответствующих графиков на этом рисунке можно видеть ту добавку к цитируемости, которую получают российские публикации с международным соавторством.

Распределения цитат обычно очень скошены вправо, что означает: львиная часть цитат приходится на небольшое количество публикаций, тогда как значительное большинство публикаций цитируется мало. В этом случае такие показатели, как относительный показатель цитирования, основанные на подсчете среднего числа ссылок на публикацию, логично дополнять показателями, основанными на подсчете высокоцитируемых публикаций. Поэтому рассмотрим топ-10% и топ-1% сегменты таких публикаций и связанные с ними индикаторы. Наличие публикаций в этих сегментах свидетельствует о вхождении страны в мировую исследовательскую элиту в конкретной области. Согласно табл. 3 (столбцы 3 и 4), США имеют наибольший "вес" в подобном элитном клубе в области КОИ. В свою очередь, Китай, обладая хорошей публикационной динамикой, к концу периода обошел по вкладу в топ-10% сегмент мировой литературы по КОИ все страны из первой десятки за исключением США. Однако, если для статьи из США (аналогично Германии, Великобритании, Японии, Франции, Испании) попадание в топ-10% сегмент увеличивает ее шанс повысить в дальнейшем свой элитный статус до топ-1% сегмента, то для статьи из Китая (аналогично Италии, Канады, России, Австралии) это, скорее, предел возможного, что следует из сравнения показателей в столбцах 3 и 4 табл. 3.

В библиометрии накоплено достаточно свидетельств о положительном влиянии соавторства, особенно международного, на цитируемость публикаций (см., например, [14, 15]). Подтверждение этому в нашем случае мы уже видели на примере России (см. рис. 3). Попробуем проверить наличие такого влияния, обратившись к нашему разбиению стран на три агрегированные группы.

Вклад стран в общее количество цитат, а также в топ-10% и топ-1% сегменты высокоцитируемых публикаций, 2000-2017 гг.

Страна	Доля цитат, %	Вклад в топ-10% (%)	Вклад в топ-1% (%)
США	40,4	42,0	53,0
Германия	16,8	17,9	22,4
Великобритания	13,6	16,3	18,2
Китай	13,4	14,7	10,5
Япония	7,8	7,9	9,6
Канада	7,4	8,9	8,2
Франция	6,4	6,6	9,4
Италия	6,4	6,3	4,2
Австралия	5,9	7,0	7,1
Испания	4,7	6,0	7,8
Россия	2,5	2,3	2,1



Рис. 3. Средняя цитируемость публикаций стран по отношению к среднему мировому уровню цитирования (жирная горизонтальная линия)

Для оценки того, насколько эффективно та или иная страна (группа стран) производит высокоцитируемые публикации, применяют так называемый индекс высокоцитируемых публикаций (ИВЦП) [16]. В случае топ-10% сегмента его определяют как:

$$\text{ИВЦП}_{\text{топ-10\%}} \equiv \text{ПП}_{\text{топ-10\%}} / 10,$$

где $\text{ПП}_{\text{топ-10\%}}$ — доля высокоцитируемых публикаций в общем выходе публикаций данной страны (наблюдаемое значение); 10 — доля таких публикаций в об-

щедном выходе (ожидаемое значение). По определению, если такое соотношение больше 1, то данная страна лучше "мира" как производитель высокоцитируемых (в сегменте топ-10%) публикаций и, наоборот. Как следует из рис. 4 и 5, именно смешанные коллаборации были самыми эффективными поставщиками элитных публикаций: в топ-10% сегмент — в течение всего периода; в топ-1% сегмент — в течение второго полупериода, что свидетельствует на примере КОИ: межгрупповые соавторские связи улучшают показатели цитируемости публикаций.

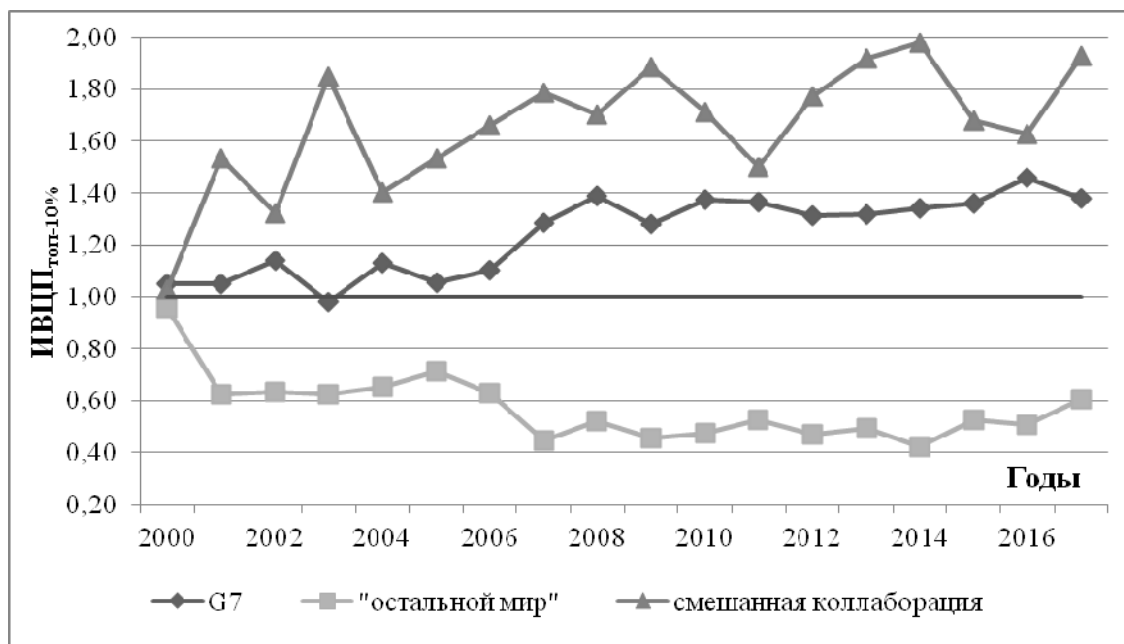


Рис. 4. Динамика индекса высокоцитируемых публикаций (топ-10%) для агрегированных групп стран

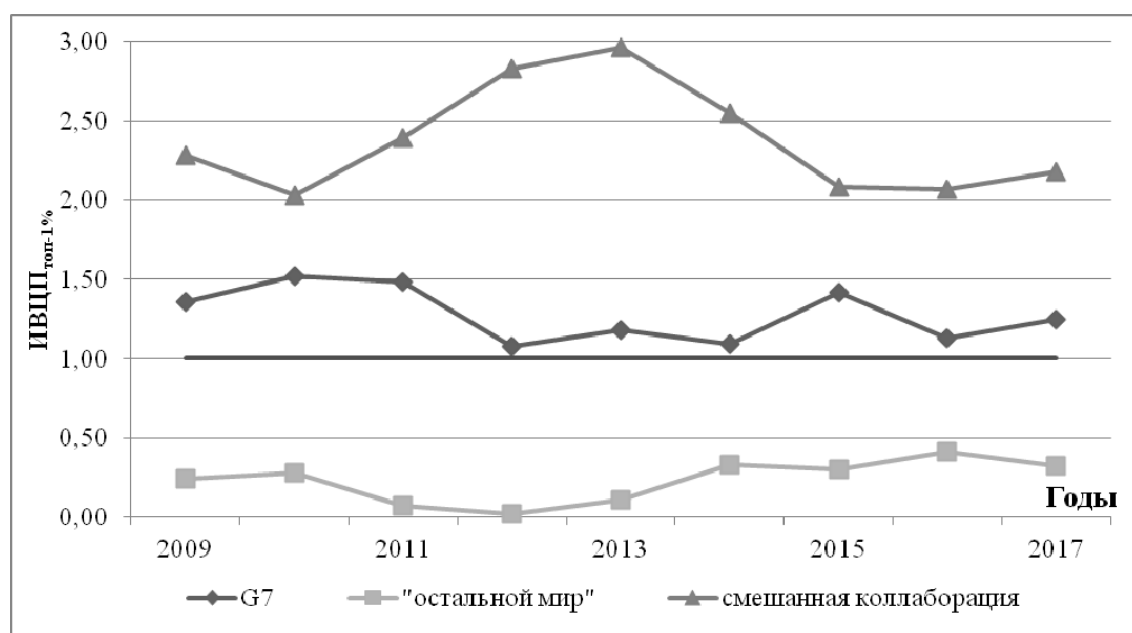


Рис. 5. Динамика индекса высокоцитируемых публикаций (топ-1%) для агрегированных групп стран

Россия заметно уступает первой десятке стран по показателям цитируемости, приведенным в табл. 3. Однако шанс попасть в элитную часть литературы по квантовой обработке информации для российской публикации несколько выше, чем для публикации из "остального мира" без стран G7: 7 против 5% для топ-10% сегмента и 0,6 против 0,3% для топ-1% сегмента, соответственно. Отечественные публикации по КОИ, хотя и не намного, "качественнее" аналогичных публикаций по нанофотонике [8]: по вкладу в топ-10% сегмент (2,3 против 2,1%) и по вкладу в топ-1% сегмент (2,1 против 1,6%) мировой научной

литературы в соответствующей области. При этом доля работ с международным соавторством в КОИ на 3 п.п. меньше, чем в нанофотонике.

В топ-10 и топ-1% сегментах мировой научной литературы по КОИ Россия представлена 110 и 10 публикациями, соответственно. 46 из 110 публикаций были подготовлены в соавторстве с учеными из США, 35 – из Германии, по 13 – из Канады и Италии, по 10 – из Японии и Франции. В наибольшем количестве публикаций из топ-1% (топ-10%) сегментов принимали участие российские организации: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН – 4 (18); Физико-

технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН – 2 (15); Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН – 2 (10); Российский квантовый центр (РКЦ) – 1 (16). Таким образом, базовый вклад в развитие и международную "заметность" отечественных исследований по квантовой обработке информации внесли академические НИИ физического профиля; в свою очередь, специально созданный для этих целей в 2011 г. РКЦ также довольно активно включился в работу.

При анализе цитирования важно не только количество цитат, но и качество самих цитирующих публикаций, что заставляет сделать соответствующие оценки. На 21.03.2019 г. российские публикации были процитированы 34134 раза. Эти цитирования в 26% случаев содержались в публикациях американских, в 17% – китайских, в 15% – немецких, в 8% – британских, в 7% – японских ученых, за которыми следуют публикации остальных стран из лидирующей десятки. Даже чисто российские публикации цитировались преимущественно американскими, китайскими, немецкими и британскими учеными, т.е. отечественные исследования по КОИ, в целом, входили в сферу внимания лидирующих стран. Отметим также, что среди публикаций, ссылающихся на российские работы, 2,3% сами имели *высокую цитируемость для области* (по версии аналитической базы данных *Essential Science Indicators (ESI)*). В качестве сравнения, для публикаций, ссылающихся на американские и китайские работы, аналогичная доля была близка: 2,2 и 2,1, соответственно.

Таким образом, выполненный анализ цитирования выявил:

- довольно низкие позиции России по показателям, зависящим от объема публикуемых статей (доля цитат и др.); по ряду относительных показателей ситуация немного более оптимистична, например: по относительному показателю цитирования Россия не уступает Китаю, а в 2003 и 2006 гг. даже превосходила среднемировой уровень; по вероятности для опубликованной статьи войти в элитную часть мировой научной литературы она опережает "остальной мир" (без G7); "качественная" структура цитирующих ее работы публикаций (согласно ESI) такая же, как у США и Китая;

- Россия не находится на периферии мировых исследований, ее работы "видимы" и активно цитируются учеными из лидирующих стран;

- по сравнению с нанофотоникой российские исследования по КОИ характеризует большой вклад в мировые топ-10 и топ-1% сегменты высоко цитируемых публикаций, а также большее участие в этом академических институтов.

К результатам можно отнести также практическую демонстрацию положительного влияния международного сотрудничества специфического характера (между группами стран) на цитируемость публикаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Квантовая обработка информации – появляющаяся область междисциплинарных исследований, способная создать прорывной потенциал для многих направлений в науке и технологиях. К настоящему моменту несколько десятков стран борются за "кван-

товое будущее". Развернувшаяся гонка сфокусирована на достижении "квантового превосходства" (этапа, на котором возможности квантового компьютера превзойдут возможности любого доступного классического компьютера), построении универсального квантового компьютера, обеспечении квантово защищенной связи. Хотя целый ряд решаемых задач уже находится на стадии инженерных разработок, в достижении основных целей еще много неопределенностей, преодоление которых невозможно без фундаментальных исследований. Это порождает потребность для заинтересованных сторон (правительств, компаний и др.) отслеживать и анализировать их продвижение, используя, в том числе, такой полезный инструмент, как библиометрия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gartner Top 10 strategic technology trends for 2019. Smart with Gartner. October 15, 2018. – URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>
2. 10 Breakthrough technologies 2017. MIT Technology Review. – URL: <https://www.technologyreview.com/lists/technologies/2017/>
3. Hurley W. Quantum computing, not AI, will define our future. November 17, 2018. –URL: <https://techcrunch.com/2018/11/17/quantum-computing-not-ai-will-define-our-future/>
4. Quantum information science. An emerging field of interdisciplinary research and education in science and engineering. Report of the NSF Workshop. US, Virginia, 1999, 36 p. – URL: <https://www.nsf.gov/pubs/2000/nsf00101/nsf00101.pdf>.
5. Future directions of quantum information processing. A Workshop on the Emerging Science and Technology of Quantum Computers, Communication, and Measurement. US, Virginia, 2017, 37 p. – URL: https://basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Future_Directions_Quantum.pdf?ver=2017-09-20-003031-450
6. Гиляревский Р.С., Либкинд А.Н., Маркусова В.А. Динамика публикационной активности России в 1993-2017 гг. по данным *Web of Science* // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2019. – № 3. – С. 1-13; Gilyarevskii R.S., Libkind A.N., Markusova V.A. Dynamics of Russian publications activity 1993-2017 based on Web of Science data // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2019. – Vol. 53, № 2. – P. 51–63.
7. Quantum information science: Applications, global research and development, and policy considerations. Congressional Research Service. Report № R45409. 2018, 12 p. – URL: <https://fas.org/sgp/crs/misc/R45409.pdf>
8. Терехов А.И. Российские исследования по нанофотонике в глобальном контексте // Мировая экономика и международные отношения. – 2019. – Т. 63. – С. 29-39.
9. Wagner C.S., Park H.W., Leydesdorff L. The Continuing Growth of Global Cooperation Networks in Research: A Conundrum for National

Government // PLoS One: e0131816. DOI:10.1371/journal.pone.0131816.

10. Luukkonen T., Tijssen R.J.W., Persson O., Sivertsen G. The measurement of international scientific collaboration // *Scientometrics*. – 1993. – Vol. 28. – P. 15-36.
11. Glanzel W. National characteristics in international scientific cooperation // *Scientometrics*. – 2001. – Vol. 51. – P. 69-115.
12. International comparative performance of the UK research base – 2013. Elsevier B.V. 2013. – 118 p. – URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/263729/bis-13-1297-international-comparative-performance-of-the-UK-research-base-2013.pdf
13. Waltman L. A review of the literature on citation impact indicators // *Journal of Informatics*. – 2016. – Vol. 10. – P. 365-391.
14. Inzelt A., Schubert A., Schubert M. Incremental citation impact due to international co-authorship in Hungarian higher education institutions // *Scientometrics*. – 2009. – Vol. 78. – P. 37-43.
15. Khor K.A., Yu L.-G. Influence of international co-authorship on the research citation impact of young universities // *Scientometrics*. – 2016. – Vol. 107. – P. 1095-1110.
16. Tijssen R.J.W., Visser M.S., Van Leeuwen T.N. Benchmarking international scientific excellence: are highly cited research papers an appropriate frame of reference? // *Scientometrics*. – 2002. – Vol. 54. – P. 381-397.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные страны – участницы исследований по КОИ и их публикационный вклад, 2000-2017 гг.

№	Страна	Число публикаций	Публикации с международным соавторством, %	№	Страна	Число публикаций	Публикации с международным соавторством, %
1	Китай	12004	22,1	24	Дания	580	74,0
2	США	11298	48,1	25	Тайвань	453	36,6
3	Германия	5019	67,4	26	Бельгия	452	75,0
4	Великобритания	4411	65,9	27	Венгрия	428	62,6
5	Япония	3651	43,4	28	Финляндия	353	71,1
6	Канада	2871	69,7	29	Мексика	336	64,9
7	Италия	2838	55,2	30	Египет	284	70,4
8	Франция	2064	65,4	31	Аргентина	279	50,2
9	Австралия	2057	64,4	32	Словакия	274	83,2
10	Испания	1762	72,8	33	Саудовская Аравия	256	89,1
11	Россия	1558	48,1	34	Турция	222	36,5
12	Швейцария	1283	71,2	35	ЮАР	208	62,0
13	Польша	1226	53,9	36	Чили	200	69,0
14	Индия	1207	31,2	37	Греция	199	53,3
15	Австрия	1201	71,9	38	Ирландия	173	78,6
16	Бразилия	1141	45,7	39	Украина	158	65,2
17	Сингапур	1125	84,0	40	Португалия	155	63,9
18	Южная Корея	927	48,5	41	Пакистан	153	51,6
19	Нидерланды	779	72,8	42	Румыния	127	41,7
20	Израиль	755	62,9	43	Новая Зеландия	116	61,2
21	Иран	704	19,6	44	Норвегия	111	76,6
22	Швеция	625	69,8	45	Малайзия	106	53,8
23	Чешская Республика	603	69,3	46	Марокко	106	64,2

Материал поступил в редакцию 16.01.20.

Сведения об авторе

ТЕРЕХОВ Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центрального экономико-математического института РАН, Москва
e-mail: a.i.terekhov@mail.ru