

НАО «Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте
Республики Казахстан»

Аналитический отчёт

РАЗВИТИЕ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИРЕ

Исполнитель - Насенкова Л.В.

Астана - 2024

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	5
1	Структура и уровень развития квантовых технологий	8
1.1	Общая информация о квантовых технологиях и их структуре	8
1.2	Квантовые вычисления.....	12
1.3	Квантовые коммуникации.....	20
1.4	Постквантовая криптография.....	25
1.5	Квантовые датчики (сенсоры)	33
2	Анализ квантовых стратегий ведущих стран мира	34
2.1	Общая информация о квантовых стратегиях стран мира	34
2.2	Национальная квантовая стратегия Австралии	46
2.3	Национальная квантовая стратегия Великобритании	51
2.4	Федеральная программа Германии по развитию квантовых технологий.....	61
2.5	Национальная квантовая миссия (NQM) Индии.....	67
2.6	Национальная квантовая стратегия Канады	71
2.7	Программы Китая по развитию квантовых технологий.....	77
2.8	Дорожные карты России по развитию квантовых технологий	81
2.9	Национальная квантовая инициатива США	89
2.10	Национальная квантовая стратегия Франции	96
3	Технологии и разработки квантовых компьютеров.....	100
3.1.	Общая информация о квантовых компьютерах.....	100
3.2	Последние достижения и разработки в области квантовых компьютеров в мире	107
3.2.1	Разработки компании - лидера IBM.....	107
3.2.2	Квантовые компьютеры других американских компаний	109
3.3.3	Разработки квантовых компьютеров в странах мира.....	109
4	Перспективные направления использования квантовых технологий в отраслях экономики.....	114
4.1	Общая характеристика	114

4.2	Квантовые технологии в медицине.....	117
4.3	Квантовые коммуникации.....	121
4.4	Квантовая космическая связь.....	126
4.5	Квантовые спутники Китая.....	130
5.	Использование квантовых технологий в сфере национальной безопасности.....	134
6.	Выводы по отчёту и рекомендации по развитию квантовых технологий в Казахстане	140
Приложения		
	Приложение 1 Публикационная и патентная активность по научному направлению «квантовые вычисления» в мире и России за 2010-2020 годы	143
	Приложение 2 Патентный ландшафт квантовых вычислений: обзор патентной деятельности за 2004-2023 годы	145
	Приложение 3 Публикационная и патентная активность по научному направлению «Квантовые коммуникации» в мире и России за 2010-2020 годы.....	154
	Приложение 4 Отчет института изучения Китая MERICS: Долгосрочные планы Китая на квантовые технологии.....	153
	Приложение 5 Топ-10 перспективных технологий квантовой связи от ВШЭ на июль 2024	171
	Приложение 6 Резюме квантовой стратегии НАТО «Summary of NATO Quantum Strategy».....	177

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

AES	Advanced Encryption Standard- Расширенный стандарт шифрования
BFSI	Banking, financial services and insurance
PQC	Post Quantum Cryptography – постквантовая криптография
NIST	The National Institute of Standards and Technology- Национальный институт стандартов и технологий США
QKD	Quantum Key Distribution – квантовое распределение ключей
QRNG	Quantum Random Number Generator –квантовый генератор случайных чисел
RQC	Russian Quantum Center - Российский квантовый центр
АО	Акционерное общество
ВЭФ	Всемирный Экономический Форум
ВШЭ	Высшая Школа Экономики
ЕС	Европейский Союз
КНР	Китайская Народная Республика
КРК	Квантовое распределение ключей
НАСА	Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США
НАТО	North Atlantic Treaty Organization Организация Североатлантического договора
НИИ	Научно-исследовательский институт
ПО	Программное обеспечение
РАН	Российская Академия Наук
РК	Республика Казахстан
РФ	Российская Федерация
США	Соединенные Штаты Америки

ВВЕДЕНИЕ

По результатам форсайта в сфере науки и технологий, проведенного Национальной академией наук при Президенте Республики Казахстан в 2024 году по направлению Информационно-коммуникационные и космические технологии, в числе наиболее перспективных задач для науки на основе анализа мировых и отечественных трендов и вызовов будущего, а также анализа мнения казахстанских экспертов – представителей научного сообщества и индустрии, выделены квантовые технологии.

Экспертным сообществом было отмечено существенное отставание Казахстана в данном направлении и связанные с этим угрозы для страны, вплоть до потери Казахстаном цифрового суверенитета. Было рекомендовано создание казахстанского квантового центра (Kazakhstan Quantum Center) с целью развития компетенций в сфере квантовых технологий.

Для подкрепления выводов проведенного форсайт-исследования проанализированы последние данные патентной активности в мире, опубликованные в 2024 году, которые подтвердили, что динамика публикации новых патентных заявок в области квантовых вычислений имеет тенденцию устойчивого роста, см. рисунок 1.

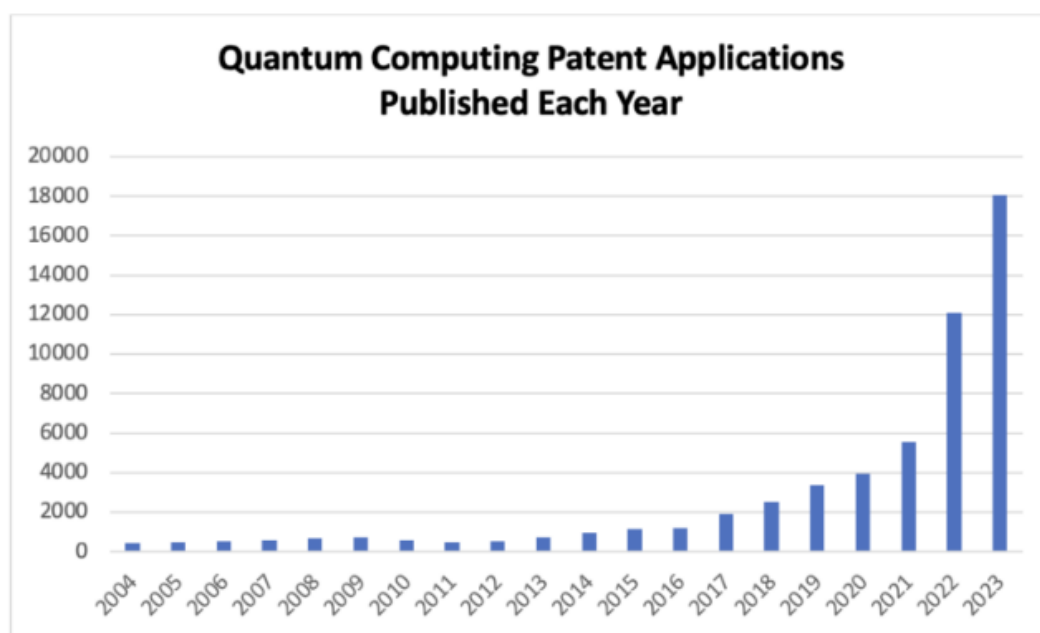


Рисунок 1- Рост патентных заявок в мире по квантовым вычислениям за период 2004 - 2023 годы [1].

Также было изучено мнение международных экспертов, в частности, экспертов ВЭФ, отмечающих возрастающий квантовый разрыв между странами и важность квантовых технологий для развития отраслей экономики и обеспечения безопасности [2].

Для развития квантовых технологий в Казахстане требуется более глубокий анализ опыта лидеров в данном направлении, а также других стран, имеющих программы и стратегии в сфере развития квантовых технологий.

Необходимо провести дополнительные аналитические исследования, так как данному направлению ранее не уделялось должного внимания. Также необходимо провести анализ развития самих квантовых технологий в мире по состоянию на конец 2024 года, уточнить их классификацию и обосновать приоритеты, актуальные для Казахстана, исходя из имеющихся компетенций и финансовых возможностей страны.

Актуальность исследования подтверждается и оценками роста глобального рынка квантовых вычислений, который будет расти совокупными темпами более чем 30% в год в течение следующих 5 лет [3].

Использованные источники

1. Patent Landscape for Quantum Computing: A Survey of Patenting Activities for Different Physical Realization Methods, 13.02.2024, <https://ipwatchdog.com/2024/02/13/patent-landscape-quantum-computing-survey-patenting-activities-different-physical-realization-methods/id=173303>
2. The world is heading for a 'quantum divide': here's why it matters, 20.01.2023, <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/the-world-quantum-divide-why-it-matters-davos2023>
3. National Quantum Strategy, <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy>

1. Структура и уровень развития квантовых технологий на современном этапе

1.1 Общая информация о квантовых технологиях и их структуре

2025 год объявлен ООН годом квантовых технологий, так как ровно 100 лет назад были открыты принципы квантовой механики, которые привели к так называемой «первой квантовой революции». С первой квантовой революцией связывают появление лазеров, транзисторов, ядерного оружия. Технологии «первой квантовой революции» сегодня применяются практически повсеместно: в компьютерах, мобильных телефонах, планшетах, системах связи, МРТ-сканерах и других приборах. По различным экспертным оценкам объем индустрии «первой квантовой революции» в денежном выражении составляет более 3 триллионов долларов США в год [1].

Второй этап развития квантовых технологий пришёлся на конец XX века, когда ученые научились управлять сложными квантовыми системами на уровне отдельных частиц, атомов и фотонов. По мнению экспертов «вторая квантовая революция» окажет на мир ещё большее влияние.

В настоящее время интерес к квантовым технологиям существенно возрос, многие страны, в том числе США, Китай и Россия, называют квантовые вычисления и квантовые коммуникации как **критически важные технологии** для своих государств. И связывают данные технологии с развитием отраслей экономики и обеспечением национальной безопасности.

Для формирования данного научного направления в Казахстане необходимо, прежде всего, определиться с дефинициями.

Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ (Россия) определяет квантовые технологии как технологии создания вычислительных систем, которые основываются на новых принципах (квантовых эффектах) и позволяют кардинально изменить способы передачи и обработки больших массивов информации. Квантовые технологии основываются на способности управлять сложными квантовыми системами на уровне отдельных частиц [2].

Сфера квантовых технологий настолько широка, что охватывает и криптографию, и сенсоры, и вычисления, и коммуникацию, отмечают эксперты ВШЭ, поэтому они делят квантовые технологии на три основные субтехнологии, см. вставку 1.1.

Вставка 1.1

Структура квантовых технологий по версии ВШЭ

- **Квантовые вычисления** объединяют новый класс вычислительных устройств. Для решения задач они используют принципы квантовой механики. Квантовый компьютер даст многократное ускорение по сравнению с «классическим» и будет способен выполнять расчеты такой сложности, которая недоступна современным суперкомпьютерам. Примерами являются сферы кибербезопасности, искусственного интеллекта и создание новых материалов.
- **Квантовые коммуникации.** Это технология криптографической защиты информации. Для передачи ключей она использует индивидуальные квантовые частицы. Передаваемую информацию невозможно перехватить, так как этому препятствует сама природа явления квантовой запутанности, которое используется при передаче. Главное преимущество квантовых коммуникаций – абсолютная защищенность информации, гарантированная законами физики.
- **Квантовые сенсоры и метрология** представляют собой совокупность высокоточных измерительных приборов, основанных на квантовых эффектах. Высокая степень контроля над состоянием отдельных микроскопических систем позволяет создавать сверхточные квантовые сенсоры с пространственной разрешающей способностью, сравнимой с размером одиночных атомов. Высокочувствительные сенсоры и детекторы необходимы для развития квантовой коммуникации, они способны улучшить возможности «классических» типов связи, в том числе космической. Квантовые сенсоры значительно повысят доступную сегодня точность и разрешение измерения в широком круге отраслей – от медицины и биотехнологий до астрономических наблюдений.

Источник: <https://issek.hse.ru/analysis/quantum>

Технологии криптографической защиты информации отнесены авторами к направлению «квантовые коммуникации», разработка квантовых компьютеров входит в общее направление «Квантовые вычисления», см. рисунок 1.1.



Рисунок 1.1.- Направления развития квантовых технологий по версии ВШЭ[2]

Аналогичный подход к определению квантовых технологий у компании «Росатом», которая при этом отмечает, что квантовые технологии - сравнительно молодое наукоемкое направление, основанное на явлениях квантовой физики, включенное странами - технологическими лидерами в перечень технологий для обеспечения стратегической конкурентоспособности и безопасности [3].

Канада в своей квантовой Стратегии выделила пять широких категорий квантовых технологий:

- Квантовые компьютеры;
- Квантовое программное обеспечение;
- Квантовые коммуникации;
- Квантовые датчики;
- Квантовые материалы.

Как отдельное направление выделяются «квантовые материалы». При этом подчеркивается, что квантовые технологии затрагивают такие направления как полупроводники и лазеры [4].

В Республике Корея квант определяют как широкий термин, охватывающий физические явления, которые включают дискретную природу физических величин, включая энергию и импульс. Квантовые объекты демонстрируют характеристики, как дискретности частиц, так и суперпозиции волн.

Эксперты из Кореи предостерегают от интерпретации кванта как частицы, см. рисунок 1.2



Источник: [5].

Рисунок 1.2 - "Крошечные физические системы с наблюдаемыми квантовыми явлениями", машинный перевод

Квантовая наука и технология применяют атрибуты квантовой физики к информационным технологиям, включая вычисления, коммуникации, зондирование и многое другое для обеспечения "сверхбыстрых вычислений", "сверхбезопасной связи" и "сверхточных измерений", отмечается в Национальной квантовой стратегии Республики Корея [5].

Рассмотрим подробнее основные субкатегории квантовых технологий.

Использованные источники по разделу 1.1

1. Дорожная карта развития сквозной цифровой технологии «Квантовые технологии», Россия, <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019kvantyi.pdf>
2. Квантовые технологии , <https://issek.hse.ru/analysis/quantum>
3. Путеводитель по понятиям квантовой тематики, 12.02.2024, <https://atommedia.online/reference/putevoditel-po-ponyatiyam-kvantovoj-t/>
4. Canada's National Quantum Strategy, <https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/sites/default/files/attachments/2022/NQS-SQN-eng.pdf>
5. Koreas National Quantum Strategy, https://quantuminkorea.org/wp-content/uploads/2024/06/Koreas-National-Quantum-Strategy-2023_c.pdf

1.2 Квантовые вычисления

Квантовые вычисления – одно из направлений квантовых технологий, использующее новый класс вычислительных устройств, которые основаны на принципах квантовой механики, передовой математики и компьютерной инженерии для выполнения определенных типов вычислений со скоростью, недостижимой для обычных компьютеров [1].

Квантовые вычисления представляют собой новаторскую область, которая имеет потенциал изменить общепринятые принципы обработки информации и решения сложнейших вычислительных задач. Квантовые вычислительные устройства основаны на особых принципах квантовой механики, где кубиты (от англ. quantum bit), единицы квантовой информации, могут находиться в суперпозиции основных состояний (нуля и единицы) благодаря явлению квантовой суперпозиции. А явление квантовой запутанности позволяет создавать и обрабатывать сложные состояния из нескольких кубит. Мощности современных суперкомпьютеров позволяют эмулировать квантовые компьютеры размером до 50-60 кубит, при этом отдельные квантовые компьютеры состоят уже из более чем 1000 кубит [2].

Развитие квантовых вычислений ведётся одновременно по нескольким направлениям, см. рисунок 1.3.

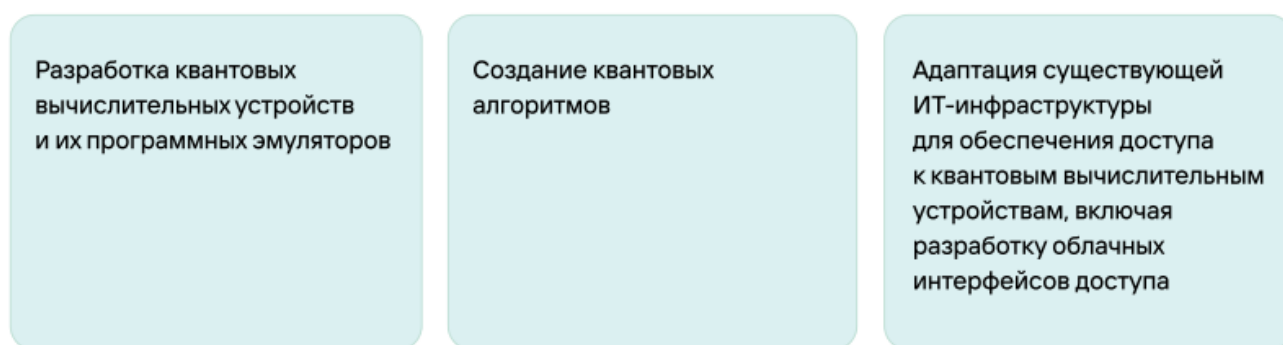


Рисунок 1.3 - Направления развития квантовых вычислений по версии РКЦ

Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ в 2022 году провёл серьёзное исследование развития высокотехнологичных направлений, в том числе квантовых технологий, выпустив «Белую книгу».

Структура высокотехнологичного направления «Квантовые вычисления», по версии ВШЭ представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Структура высокотехнологичного направления «Квантовые вычисления» по версии ВШЭ [3].

Отдельно авторы Белой книги выделяют технологии разработки полного стека программного обеспечения для квантовых вычислений (операционные системы, компиляторы, библиотеки прикладных алгоритмов), так как квантовые процессоры работают принципиально иначе, чем классические [3].

Технически квантовые компьютеры, как и квантовые симуляторы, могут быть построены на основе различных физических платформ, которые представлены на рисунке 1.5 с указанием степени их технологической зрелости.

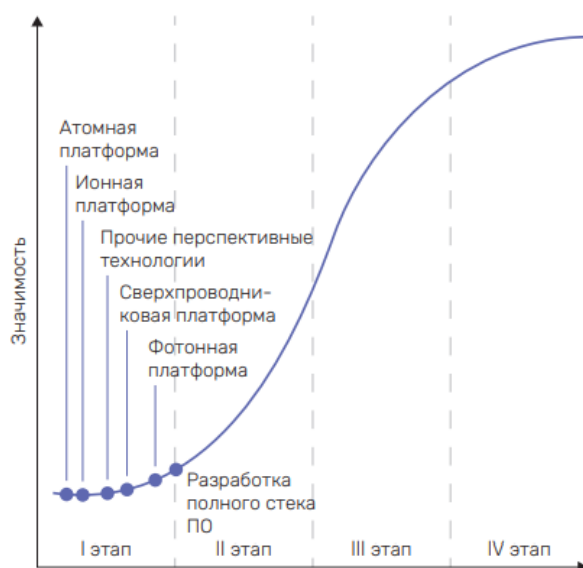


Рисунок 1.5 - Кривая технологической зрелости по направлению «Квантовые вычисления» [3].

Этапы технологической зрелости

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике) [3]

Лидерами в области квантовых вычислений в мире являются США и Китай. При этом, Китай уверенно лидирует как по публикационной активности в сфере квантовых вычислений (рисунок 1.6), так и по патентной активности, см. рисунок 1.7.

Публикации по квантовым вычислениям в мире 2018-2022

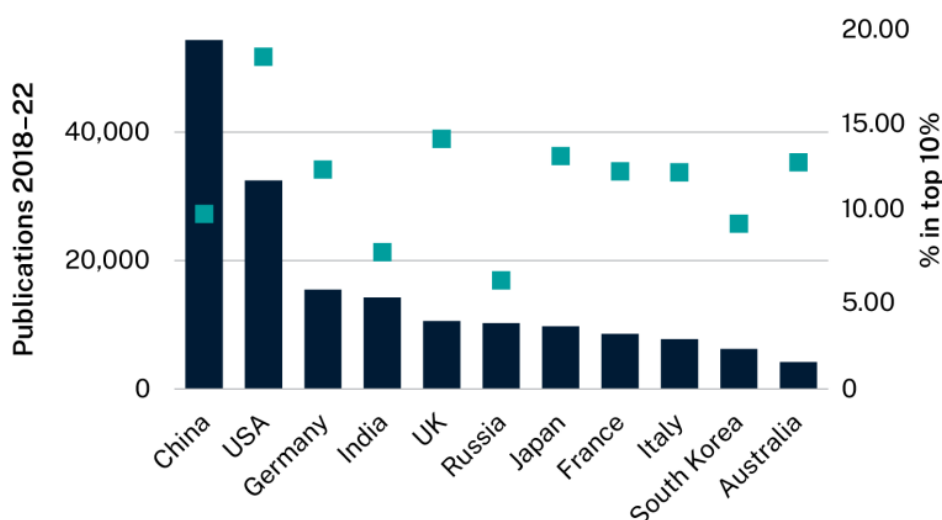


Рисунок 1.6 - Распределение публикаций по странам мира за 2018-2022 гг. [4].

Доля России в мире по публикациям в сфере квантовых вычислений составляла в 2020 году всего 4,7%, см. приложение 1 .

Патентная деятельность является эффективным индикатором скорости инноваций и распределения ресурсов в технологической области. В начале 2024 года международными экспертами были рассмотрены новейшие направления развития и тенденции в индустрии квантовых вычислений через призму ее патентного ландшафта за период с 2004 по 2023 год.

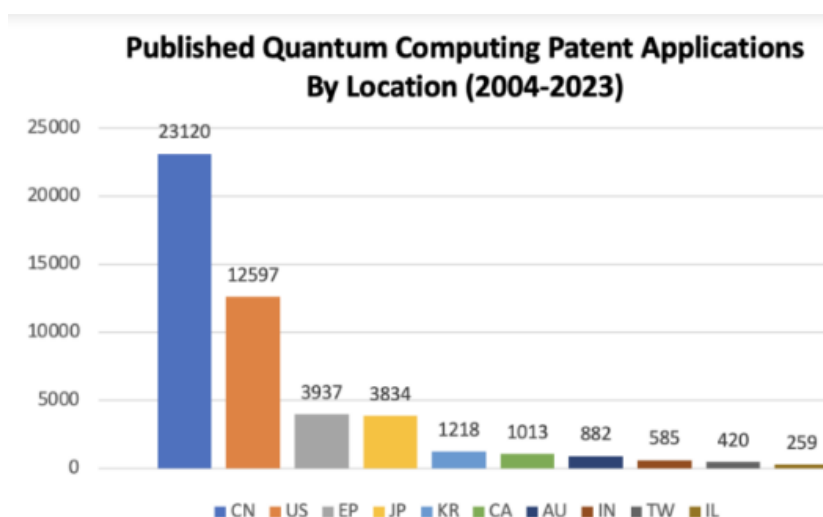


Рисунок 1.7 - Публикация патентов по странам за период 2004-2023 гг. [5]

Как показали исследования, Национальное управление интеллектуальной собственности Китая (CNIPA) лидирует по количеству опубликованных патентных заявок на квантовые вычисления, за ним следуют Патентное и товарное ведомство США (USPTO), Европейское патентное ведомство (EPO) и Патентное ведомство Японии (JPO). Значительное количество патентных заявок на квантовые вычисления было также подано за рассматриваемый период в патентные ведомства Южной Кореи, Канады, Австралии, Индии, Тайваня и Израиля [5].

Также международными экспертами было проанализировано распределение патентных заявок, направленных на ведущие квантовые компьютерные модальности (физические платформы, на которых реализуются вычисления). Патентная заявка классифицируется как направленная на определенную модальность, если ее аннотация или формула изобретения содержат ключевые слова, связанные с этой модальностью [5].

Как видно из рисунка 1.8, количество патентных заявок, направленных на сверхпроводящие квантовые вычисления, почти соответствует общему количеству других модальностей вместе взятых и составило 1759 заявок.

По мнению экспертов это свидетельствует о том, что сверхпроводящие квантовые вычисления являются наиболее зрелым в коммерческом плане

подходом и отражают влияние крупных корпораций, которые лидируют в данной области [5].

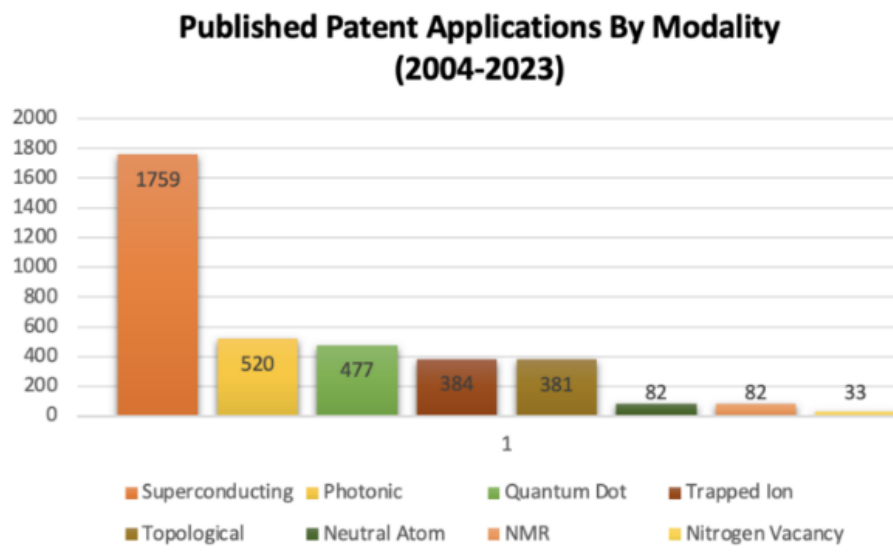


Рисунок 1.8 - Публикация патентов по видам квантовых вычислений за период 2004-2023 гг. [5]

Далее патентные заявки распределились следующим образом:

- вычисления на фотонной платформе – 520;
- вычисления на квантовых точках – 477;
- вычисления на захваченных ионах – 384;
- вычисления на топологических методах – 381.

Относительно небольшое количество патентных заявок на нейтральные атомы, ядерный магнитный резонанс и квантовые вычисления на вакансиях азота указывает на то, что эти технологии в основном разрабатываются академическими учреждениями и компаниями на ранней стадии.

Исследователями также были оценены темпы роста (динамика) патентов по годам, что демонстрирует степень зрелости технологий и тенденции их развития.

Темпы роста патентных заявок в сфере квантовых вычислений по направлениям:

- сверхпроводящие квантовые вычисления в целом демонстрирует здоровую тенденцию к росту, но в 2023 году наблюдается небольшое замедление;
- квантовые вычисления фотонные и на захваченных ионах растут быстро;

- топологические квантовые вычисления испытали небольшое снижение патентных публикаций в 2023 году;
- технология квантовых точек достигла пика в публикациях патентных заявок в 2019 году, за которым последовала тенденция к снижению, что потенциально указывает на снижение интереса к этой области, см. рисунок 1.9.

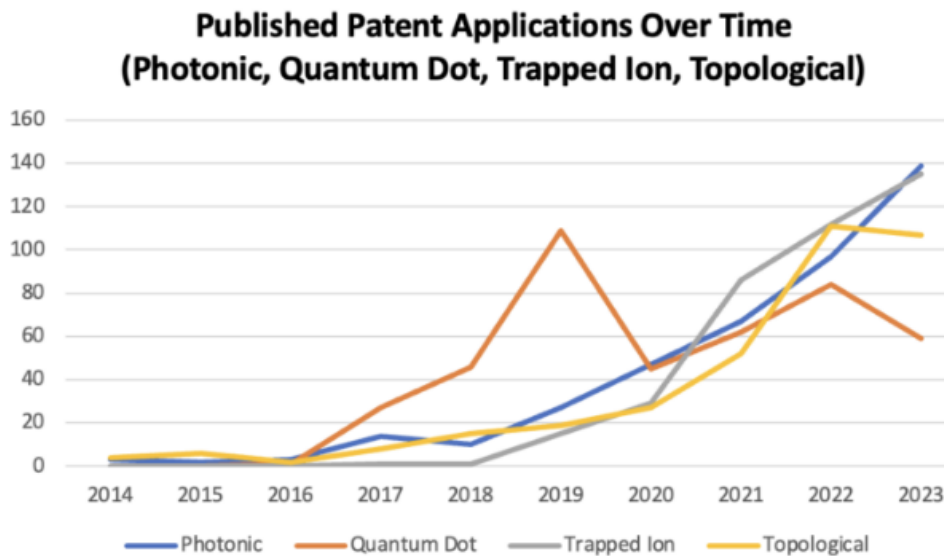


Рисунок 1.9 – Динамика публикации патентов по видам вычислений за период 2014-2023 годы [5]

Несмотря на небольшое количество, патентные заявки на нейтральные атомы, ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и квантовые вычисления с азотными вакансиями в последние годы быстро растут, см. рисунок 1.10.

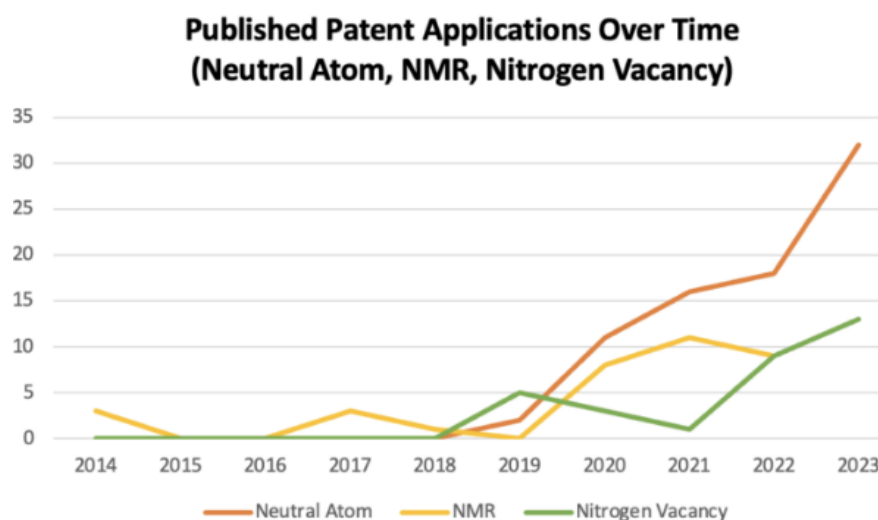


Рисунок 1.10 -Динамика публикации патентов по видам квантовых вычислений за 2014 -2023 годы [5].

Хотя в Китае самое большое общее количество патентных заявок на квантовые вычисления, Соединенные Штаты лидируют по количеству патентных заявок, специфичных для каждого основного подхода к физической реализации. Это может означать, что США лидируют в области НИОКР для квантового оборудования, в то время как Китай больше фокусируется на квантовом программном обеспечении и приложениях квантовых компьютеров, делают выводы эксперты [5].

Количество патентных публикаций в США доминирует в области фотонных и квантовых точечных технологий, тогда как китайские публикации заметно конкурентоспособны в области сверхпроводимости, захваченных ионов и топологических квантовых вычислений, см. рисунок 1.11.

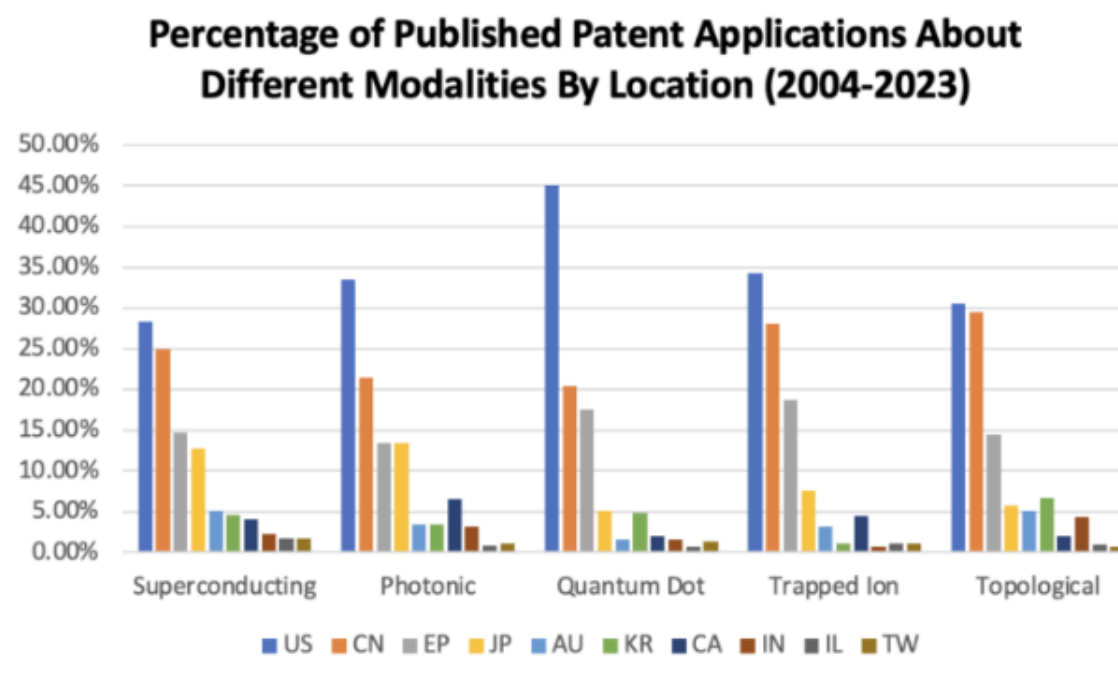


Рисунок 1.11 - Публикация патентов по видам вычислений и странам за период 2004-2023 гг. [5]

Европейские патентные публикации демонстрируют более сбалансированное распределение по различным модальностям, в то время как японские заявки демонстрируют особую концентрацию на сверхпроводящих и фотонных технологиях [5].

Полный текст исследования патентного ландшафта по квантовым вычислениям представлен в приложении 2 к отчету.

По данным McKinsey, рынок квантовых вычислений может вырасти примерно до 80 миллиардов долларов уже к 2035 или 2040 году [6].

Наибольший интерес для Казахстана, как потенциального участника научных консорциумов по данному направлению, представляют сервисы доступа к облачным платформам для квантовых вычислений, которые позволят работать по следующим направлениям:

- Программное обеспечение для квантовых вычислений;
- Квантовые алгоритмы;
- Эмуляторы квантовых процессоров;
- Методы коррекции и подавления ошибок.

Информация о платформах для квантовых вычислений представлена в разделе 7.

Использованные источники по разделу 1.2

1. What is Quantum Computing, <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-quantum-computing>

2. https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/51b/qoj849o65fbxhsllly3l9l5xvaz3wd1ha/FBT_12_02_2024_V2.pdf?170774935322904136

3. Развитие отдельных высокотехнологичных направлений в России и мире, 2022, https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_opublikovalo_beluyu_knigu_vysokih_tehnologiy_v_rossii_i_za_rubezhom.html

4. Quantum technologies, <https://www.industry.gov.au/publications/list-critical-technologies-national-interest/quantum-technologies>

5. Patent Landscape for Quantum Computing: A Survey of Patenting Activities for Different Physical Realization Methods, 13.02.2024, <https://ipwatchdog.com/2024/02/13/patent-landscape-quantum-computing-survey-patenting-activities-different-physical-realization-methods/id=173303>

6. Quantum Computing: Potential and Challenges ahead, 19.06.2024, <https://www.plainconcepts.com/quantum-computing-potential-challenges/>

1.3. Квантовые коммуникации

Квантовые коммуникации определяют как область знаний и технологий, связанных с передачей квантовых состояний в пространстве.

Корпорация Росатом, ответственная за развитие квантовых технологий в России, отмечает, что наиболее развитое направление в рамках технологии квантовых коммуникаций - это квантовая криптография, или, более точно, квантовое распределение ключей, которое определяется как совокупность методов, направленных на выработку между удаленными пользователями общего секретного ключа, использующегося в дальнейшем для шифрования [1]. То есть включает в квантовую криптографию квантовое распределение ключей.

Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ в структуре высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации» выделяет четыре группы технологий: квантовые коммуникационные сети, недоверенные промежуточные узлы связи, атмосферные и космические линии связи и клиентские устройства квантовых коммуникаций, см. рисунок 1.12.



Рисунок 1.12 – Структура высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации» [2].

В отчете отмечается, что именно данные технологии определяют будущий облик флагманских продуктов и сервисов на основе квантовой коммуникаций (КК).

В отчете ВШЭ отмечается, что одним из направлений КК является создание защищенных каналов связи на основе квантового распределения ключей (КРК) – метода защиты передаваемой информации с использованием технологий КК, позволяющего гарантированно защитить данные от компрометации и несанкционированного доступа [2].

Кривая технологической зрелости по направлению «квантовые коммуникации» по версии ВШЭ представлена на рисунке 1.13.

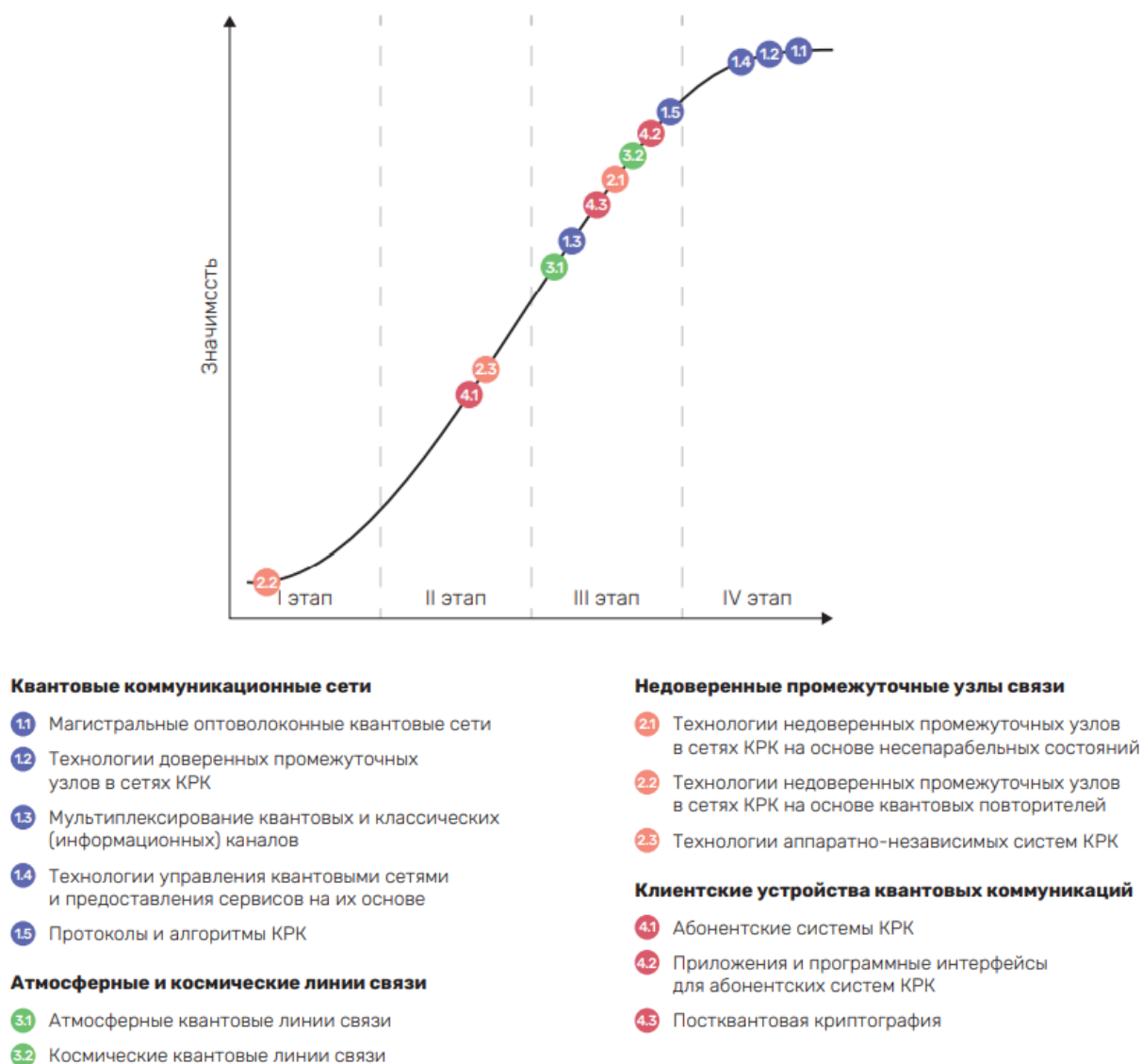


Рисунок 1.13 - Кривая технологической зрелости по направлению «Квантовые коммуникации» по версии ВШЭ [2].

Как видно из рисунка, технологии по квантовым коммуникационным сетям преимущественно находятся на IV этапе технологической зрелости (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике) и давно используются на практике. В структуре направления КК указываются протоколы и алгоритмы КРК, абонентские системы КОК и постквантовая криптография.

В Национальной Стратегии Австралии также рассматривают квантовые коммуникации или квантовую связь неразрывно с вопросами кибербезопасности и постквантовой криптографии, см. вставку 1.2.

Вставка 1.2

Структура и направления использования квантовых коммуникаций (квантовой связи) в Стратегии Австралии, машинный перевод

Квантовая связь может обеспечить более быстрые и безопасные сети связи.

Приложения включают:

- передача информации между квантовыми компьютерами;
- обмен криптографическими ключами между удаленными людьми таким образом, что их копирование кем-либо другим становится невозможным;

С помощью квантовой коммуникации мы можем:

- продвигать следующее поколение кибербезопасности и защищенных коммуникаций;
- создавать высокоскоростные сети, включая будущий квантовый интернет, который обеспечит множество новых приложений;
- позволяют реализовать распределенные квантовые вычисления, увеличивая вычислительную мощность.

Постквантовая криптография (также называемая квантово-устойчивой криптографией) - это криптографическая система, которая защищена как от квантовых, так и от классических компьютеров. Она может взаимодействовать с существующими протоколами связи и сетями.

Источник: <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy> [3]

В некоторых документах данное направление так и называется «Квантовые коммуникации и безопасность», например в документах Всемирного Экономического Форума, создавшего специальное подразделение по квантовым технологиям [4].

Если раньше постквантовая криптография рассматривалась экспертами как технология будущего, то уже в 2022 году эксперты ВШЭ в своей Белой книге по технологиям отнесли постквантовую криптографию к III этапу зрелости. Что означает зрелость технологии и преобладание рыночной аналитики. А в конце октября 2024 года международная компания Gartner в своем прогнозе перспективных технологий «Gartner Top 10 Strategic Technology Trends Report-2025» впервые включила квантовую криптографию в топ 10 технологий на 2025 год, см. вставку 1.3.

Вставка 1.3

Gartner Top 10 Strategic Technology Trends Report-2025

(машинный перевод с английского, фрагмент)

Тенденция 4: Постквантовая криптография (PQC): защита данных, устойчивая к рискам дешифрования квантовых вычислений (QC).

- **Преимущества для бизнеса:** защищает данные от рисков безопасности, которые возникнут с появлением **квантовых вычислений**.
- **Проблемы:** Алгоритмы PQC не являются заменой существующих асимметричных алгоритмов. Текущие приложения могут иметь проблемы с производительностью, потребуют тестирования и, возможно, должны быть переписаны.

Источник: <https://www.gartner.com/en/articles/top-technology-trends-2025>[5]

В мире уже реализован целый ряд коммерческих проектов с использованием квантовых сетей связи, см. раздел 5. Лидером в данном направлении является Китай, что подтверждено как разработками, так и публикациями и патентами по квантовым коммуникациям, см. приложение 3.

Прогнозируется, что **мировой рынок квантовых коммуникаций** вырастет с 861,8 млн долларов США в 2024 году до 5 382,0 млн долларов США к 2029 году, при среднегодовом темпе роста 44,2% с 2024 по 2029 год [6].

Как отмечают международные эксперты, рынок квантовых коммуникаций обусловлен ростом государственных инвестиций в квантовые технологии и быстрым прогрессом в квантовой криптографии и вычислениях во всем мире. Развитие квантовых вычислений привело к увеличению потребности в квантово-устойчивых сетях для защиты от утечек данных, что способствует росту рынка.

Растущая обеспокоенность по поводу кибератак и эскалация внедрения квантовых технологий в защищенных коммуникациях в различных отраслях, включая банковское дело и финансы, госуправление и оборону, здравоохранение, а также ИТ и телекоммуникации, будут и дальше продвигать рынок квантовых коммуникаций [6].

В связи с важностью технологий постквантовой криптографии рассмотрим её в следующем разделе более подробно.

Использованные источники по разделу 1.3

1. Путеводитель по понятиям квантовой тематики, 12.02.2024, <https://atommedia.online/reference/putevoditel-po-ponyatiyam-kvantovoj-t/2>.
2. Развитие отдельных высокотехнологичных направлений, Москва, 2022, https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_opublikovalo_beluyu_knigu_vysokih_tehnologiy_v_rossii_i_za_rubezhom.html
3. Australia's National Quantum Strategy, <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy>
4. What is quantum technology and what are its benefits, 03.07.2024, <https://www.weforum.org/stories/2024/07/explainer-what-is-quantum-technology/>
5. Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2025, 21.10.2024 <https://www.gartner.com/en/articles/top-technology-trends-2025>
6. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-networking-market-205935789.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA-aK8BhCDARIsAL

1.4. Постквантовая криптография

Постквантовая криптография относится к набору методов и криптографических алгоритмов, разработанных для противостояния возможностям будущих квантовых компьютеров. Эти машины, гораздо более мощные, чем классические компьютеры, могут взломать асимметричную криптографию, тем самым поставив под угрозу безопасность данных и коммуникаций. Постквантовая криптография направлена на разработку методов защиты, которые остаются невзламываемыми даже передовыми квантовыми технологиями, см. вставку 1.4.

Вставка 1.4

О технологии квантовой криптографии

Технология, которая лежит в основе квантовой криптографии, решает главную проблему классической криптографии - безопасное распределение ключей.

Ключ, то есть код, с помощью которого шифруется сообщение, генерируется и передается при помощи фотонов, приведенных в определенное квантовое состояние. Любая попытка взлома будет определена еще до передачи сообщения, значит «подслушать» сообщение, зашифрованное таким устройством, и остаться незамеченным будет невозможно.

Источник: <https://www.rbc.ru/magazine/2018/01/5a3ccf2e9a79474240f50294>[1]

Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ в структуре рассмотренного выше направления «Квантовые коммуникации» технологии, относящиеся к безопасности сетей, распределила по трём направлениям:

Протоколы и алгоритмы КРК отнесены к первому поднаправлению – «квантовые коммуникации и сети» и находятся на **IV этапе зрелости**, плато, снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике.

Технологии аппаратно-независимых систем КРК отнесены к третьему поднаправлению – «недоверенные промежуточные узлы связи» и находятся на **II этапе зрелости**

К четвертому поднаправлению – «клиентские устройства квантовых коммуникаций» отнесены:

Абонентские системы КРК - II этап зрелости, расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

Постквантовая криптография – III этап зрелости, зрелость технологии и преобладание рыночной аналитики [1].

То есть ВШЭ рассматривает постквантовую криптографию как одно из направлений квантовой безопасности, которое развивается вместе с технологиями квантового распределения ключей (КРК или QKD в английской транскрипции). При этом в настоящее время протоколы и алгоритмы КРК уже получили достаточное развитие и незначительно опережают технологии постквантовой криптографии.

В западных отчётах более широкое понимание постквантовой криптографии (PQC) как части криптографии, актуальной и при появлении квантовых компьютеров и квантовых атак. Отмечается, что PQC использует математические методы для генерации алгоритмов, которые разработаны для защиты, как от классических, так и от квантовых компьютеров [2].

Таким образом, квантовая криптография относится к методу шифрования данных или преобразования простого текста в искаженный текст, так что понять его может только тот, у кого есть точный «ключ». Она использует стандарты квантовой механики для кодирования данных и их передачи таким образом, что их невозможно взломать [2].

В ноябре 2024 года Quantum Insider опубликовал отчет, в котором подробно описывается растущий рынок квантовой безопасности. В нем особое внимание уделяется четырем основным сегментам:

- Постквантовая криптография (PQC);
- Квантовое распределение ключей (QKD);

- Квантовый Интернет;
- Квантовые генераторы случайных чисел (QRNG).

Quantum Insider прогнозирует, что рынок квантовой безопасности в целом вырастет с ~0,7 млрд долларов США сегодня до ~10 млрд долларов США к 2030 году, что будет обусловлено среднегодовым темпом роста более 50%, а основными сегментами станут постквантовая криптография, квантовое распределение ключей, квантовый Интернет и квантовые генераторы случайных чисел [2].

Вставка 1.5

О рынке постквантовой криптографии

(машинный перевод)

Рынок PQC фокусируется на создании криптографических систем, защищенных от опасностей, создаваемых квантовыми вычислениями, которые могут поставить под угрозу такие устоявшиеся методы, как ECC (криптография на эллиптических кривых) и RSA (Rivest-Shamir-Adleman). Исследователи в области криптографии и ИТ- компании создают квантово-устойчивые алгоритмы, такие как системы на основе решеток и кодов.

Источник: <https://thequantuminsider.com> [2]

При этом авторы отчета выделяют следующие сегменты рынка PQC:

- Квантово-безопасное оборудование;
- Квантово-устойчивые алгоритмы;
- Квантово-безопасные криптографические библиотеки;
- Квантово-безопасные VPN, службы электронной почты и системы обмена сообщениями;
- Квантово-безопасные блокчейн - решения;
- Решения квантово-безопасной аутентификации;
- Квантово-устойчивые продукты шифрования [2].

В отчёте отмечается, что исследования в области PQC вызывают растущий интерес у университетов и научно-исследовательских институтов. Общее количество **научных работ** в этой области за все время превысило **300 тысяч**, а общее количество цитируемых **патентов** превысило **60 тысяч** [2].

Эксперты Quantum Insider акцентируют внимание на том, что технологии PQC продвигаются вперед вместе с NIST, завершая разработку квантово-устойчивых криптографических стандартов, в то время как QKD и QRNG предоставляют специализированные решения для безопасного обмена ключами и генерации действительно случайных чисел, устраняя уязвимости, возникающие при квантовых вычислениях. Характеристика сегментов QKD и QRNG в отчёте представлена во вставке 1.6.

Вставка 1.6

Квантовое распределение ключей (QKD)

(машинный перевод)

Квантовое распределение ключей - еще одно важное направление на рынке квантовой безопасности, особенно для приложений, требующих высочайшего уровня целостности данных. QKD использует принципы квантовой физики для защиты обмена ключами, которые составляют основу шифрования.

В отличие от традиционных методов, QKD предполагает отправку криптографических ключей, закодированных в фотонах, по оптическим волокнам. Квантовые свойства этих фотонов делают практически невозможным перехват и декодирование информации без обнаружения, поскольку любая попытка измерить квантовую частицу изменяет ее состояние. Эта функция обеспечивает дополнительный уровень безопасности, особенно для отраслей, где утечки данных могут иметь серьезные последствия.

В настоящее время QKD используется в паре с существующими методами симметричного шифрования, такими как AES (Advanced Encryption Standard), для аутентификации каналов связи, создавая безопасную среду для конфиденциальных обменов. Несмотря на потенциал, широкое внедрение QKD ограничено требованиями инфраструктуры и проблемами совместимости с ИС.

Квантовые генераторы случайных чисел (QRNG)

QRNG представляют собой сдвиг в том, как генерируются случайные числа, необходимые для криптографических алгоритмов. Традиционные генераторы случайных чисел зависят от алгоритмических или аппаратных решений, которые могут быть предсказуемыми при определенных условиях.

Однако QRNG генерируют случайные числа из недетерминированных квантовых процессов, создавая последовательность, которая действительно случайна и непредсказуема. Эта технология особенно актуальна для криптографических приложений, поскольку многие современные системы могут быть восприимчивы к квантово-управляемым методам дешифрования, если их методы генерации случайных чисел будут скомпрометированы.

QRNG обычно полагаются на фотонные методы для получения случайных чисел, и в отчете подчеркивается их растущая значимость по мере того, как отрасли принимают квантовые решения. Используя квантовую случайность, QRNG могут предложить гарантии безопасности, которые трудно сопоставить с классическими генераторами случайных чисел, преимущество, которое привлекает внимание секторов со строгими требованиями к безопасности.

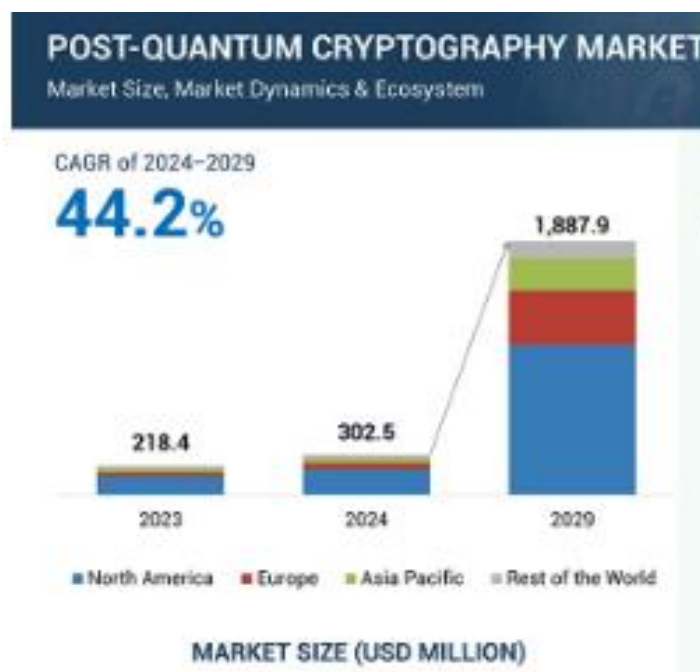
Источник: <https://thequantuminsider.com> [2]

Quantum Insider подтверждает рост инвестиции в рынок квантовой безопасности и интерес к нему. Помешать росту рынка могут два важных фактора:

- нехватка квалифицированных специалистов;
- ошибки в современных криптографических алгоритмах [2].

Возрос интерес к технологиям постквантовой криптографии и у рыночных аналитиков. В октябре 2024 года было опубликовано несколько отчетов отдельно по рынку постквантовой криптографии.

Согласно первому прогнозу, объем рынка постквантовой криптографии будет увеличиваться с совокупным годовым темпом прироста (CAGR) 44,1% с 302,5 млн долларов США в 2024 году до 1 887,9 млн долларов США к 2029 году, см. рисунок 1.14



Источник: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/post-quantum-cryptography-market-126986626.html> [3]

Рисунок 1.14 – Прогноз по развитию рынка постквантовой криптографии до 2029 года

Согласно второму отчёту объем мирового рынка **квантовой криптографии** в 2023 году оценивался в 170,4 миллионов долларов США. Прогнозируется, что рынок вырастет с 213,8 миллионов долларов в 2024 году до **1 617, 5 миллионов** долларов США к 2032 году, см. вставку 1.7

Вставка 1.7

Прогноз до 2032 года от FortuneBusinessInsights

(машинный перевод)

Объем мирового рынка **квантовой криптографии** в 2023 году оценивался в 170,4 млн долларов США. Прогнозируется, что рынок вырастет с 213,8 млн долларов США в 2024 году до **1 617,5 млн долларов США к 2032 году**, что соответствует среднегодовому темпу роста 28,8% в прогнозируемый период.

Достижения в области беспроводных сетевых технологий способствовали разработке и внедрению квантовой криптографии. Беспроводные сети, такие как Wi-Fi, Bluetooth и сотовые сети, повсеместно распространены в современном обществе. Их использование увеличило объем данных, передаваемых по беспроводной связи.

Однако высокие затраты на внедрение и установку являются одним из факторов, препятствующих принятию этой технологии. Это относительно новая технология, требующая специализированного оборудования и программного обеспечения. Это оборудование может быть дорогим, а затраты на установку и обслуживание также могут быть высокими. Поскольку эта технология все еще находится на ранних стадиях развития, доступность решений и услуг, интегрирующих квантовую криптографию, в настоящее время ограничен.

Источник: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/quantum-cryptography-market-10021>, 13.01.2025 [4]

Эксперты отмечают, что рынок постквантовой криптографии будет стимулироваться растущими требованиями к кибербезопасности во многих вертикалях, включая правительство, оборону и BFSI (Banking, financial services and insurance). Но разработка эффективных постквантовых решений против потенциальных квантовых угроз во многом зависит от **постоянных технологических улучшений** в криптографических методах, а также инвестиций в исследования и инновации.

Ограничивающими рост рынка PQС факторами являются:

- Высокие затраты. Переход на PQС требует значительной разработки ПО и усовершенствования оборудования, а также большей вычислительной мощности;
- PQС использует ключи значительно большего размера, чем обычные алгоритмы с открытым ключом. Огромный размер ключа приводит к более длительному времени шифрования и дешифрования, а также повышает требования к памяти, хранилищу и пропускной способности сети;

- PQC и AI/Gen. Генеративный ИИ улучшает протоколы безопасности PQC и помогает создавать квантово-устойчивые алгоритмы, но это приводит к росту стоимости сложных решений PQC;

Факторы, стимулирующие рост рынка постквантовой криптографии:

- 1) Обязательное внедрение PQC и соблюдение нормативных требований в бизнесе, чувствительном к данным, будет стимулировать спрос;
- 2) Из-за экспоненциального роста квантовых технологий вскоре возникнет значительная потребность в услугах миграции, что увеличит потребность в решениях PQC. Ожидается, что услуги миграции будут становиться все более и более важными в индустрии постквантовой криптографии. Но это требует специализированных знаний для проведения аудита систем, выбора алгоритмов, внедрения и управления. Подробнее об ограничениях и возможностях развития PQC в приложении 4.

Ранние последователи PQC получают выгоду от преимуществ первопроходцев, которые обеспечивают текущие операции и предлагают долгосрочную безопасность, отмечают эксперты.

Используемые источники по разделу 1.4

1. Развитие отдельных высокотехнологичных направлений, Москва, 2022, https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_opublikovalo_beluyu_knigu_vysokih_tehnologiy_v_rossii_i_za_rubezhom.html
2. Report Reveals Growing Interest, Investments In Quantum Security Market, 27.11.2024, <https://thequantuminsider.com/2024/11/27/report-reveals-growing-interest-investments-in-quantum-security-market/>
3. Post-Quantum Cryptography , <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/post-quantum-cryptography-market-126986626.html>
4. Post-Quantum Cryptography (PQC) Market, 12.10.2024, <https://www.forinsightsconsultancy.com/reports/post-quantum-cryptography-market>

1.5. Квантовые датчики (сенсоры)

Квантовые сенсоры - высокоточные измерительные приборы, работа которых построена на эффектах квантовой механики. Они отличаются крайне высокой чувствительностью, благодаря чему способны делать измерения, недоступные классическим датчикам [1].

Квантовые сенсоры используются в автомобилестроении, здравоохранении, промышленности, геологии, транспортной отрасли, компьютерной разработке и многих других сферах. Но по-настоящему бесценный вклад, по мнению ученых, квантовая сенсорика может принести в медицину. Благодаря своей чувствительности датчики способны зафиксировать первые сигналы заболевания еще до того, как их можно будет «поймать» другими методами диагностики. А выявление болезни на ранней стадии - один из главных факторов успешного лечения. [2].

Как показал анализ, в квантовых стратегиях и дорожных картах стран мира предусмотрено развитие данного научного направления. Области использования квантовых сенсоров в России к 2024 году согласно Дорожной карте, утвержденной в 2019 году, представлены на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 - Области использования квантовых сенсоров в РФ к 2024 г. [2].

В дорожной карте РФ по квантовым технологиям отмечается, что одной из главных тенденцией рынка станет применение квантовой сенсорики в области медицины. В частности, их использование будет востребовано в цитологии и создании новых медицинских устройств, например, для диагностики и лечения онкологических и других заболеваний [2].

Еще одним из главных трендов, отмечают эксперты, является растущий спрос на интернет вещей, что в значительной степени стимулирует рост рынка квантовых сенсоров. Также рост рынка квантовых датчиков стимулирует **развитие глобальных навигационных систем**. Как известно они широко используются в аэрокосмической и автомобильной отраслях.

В квантовой стратегии Великобритании квантовые датчики выделены в числе важнейших приоритетов и по ним ещё в 2015 году была разработана отдельная дорожная карта [3]. В стране создан специализированный центр «Национальный центр квантовых технологий Великобритании в области датчиков и метрологии», который переводит лабораторные демонстрации в практические устройства с революционными миниатюрными компонентами и прототипами [4].

В обновленной стратегии Великобритании, в марте 2023 года, в числе задач указывается разработка квантовых датчиков. Отмечается, что они предоставляют новые возможности для мониторинга и обслуживания критически важной инфраструктуры, а также для улучшения результатов лечения пациентов с такими заболеваниями, как деменция, эпилепсия и рак, за счет ранней диагностики и сверхточной хирургии» [5].

Квантовые датчики также тесно связаны с квантовым зондированием.

Использованные источники по разделу 1.5

1. Путеводитель по понятиям квантовой тематики, 12.02.2024, , <https://atommedia.online/reference/putevoditel-po-ponyatiyam-kvantovoj-t/>
2. Дорожная карта развития сквозной цифровой технологии «Квантовые технологии», Россия, <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019kvantyi.pdf>
3. A roadmap for quantum technologies in the UK, <https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Roadmap.pdf>
4. The UK National Quantum Technology Hub in Sensors and Metrology, https://phyweb.phys.soton.ac.uk/quantum/documents/procsapie9900_990009.pdf
5. <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-missions>

2. Анализ квантовых стратегий ведущих стран мира

2.1 Общая информация о квантовых стратегиях и программах стран мира

По данным экспертов Всемирного Экономического форума (ВЭФ) на январь 2021 года 17 стран мира имели национальную инициативу или стратегию поддержки исследований и разработок в области квантовых технологий, в трех странах стратегии находились в стадии разработки, а в 12 странах мира имелись значительные финансируемые или одобренные правительством инициативы [1].

В презентации Российского квантового центра RQC представлены 19 стран мира, имеющих национальные квантовые программы и стратегии на 2022 год по периодам их разработки и стратегия ЕС, см. рисунок 2.1.

НАЦИОНАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ ПРОГРАММЫ В МИРЕ



Источник: Презентация Российского квантового центра в Астане 07.11.2024 г.

Рисунок 2.1- Информация о национальных квантовых программах в мире по данным RQC

Выборочный анализ Стратегий некоторых стран, представленных в презентации RQC, показал, что данные по периодам и объемам финансирования требуют дополнительных исследований и уточнений.

В связи с этим были изучены программы и стратегии по развитию квантовых технологий в 17 странах мира, см. таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Информация о квантовых стратегиях и программах стран мира

Страна	Наименование Стратегии	Дата принятия
1.Австралия	National Quantum Strategy <i>Построение процветающего будущего с помощью квантового преимущества Австралии</i>	май 2023
2.Великобритания	1)A roadmap for quantum technologies in the UK 2) National Quantum Strategy UK	сентябрь 2015 март 2023
3.Германия	1.Quantum technologies –from basic research to market Квантовые технологии – от фундаментальных исследований до рынка, Федеральная программа	сентябрь 2018
4.Дания	Strategi for Kvanteteknologi, ч.1 NationalStrategi for Kvanteteknologi, ч. 2	июнь 2023 сент. 2023
5.Израиль	תל"מ – פורום לתשתיות לאומיות למחקר ופיתוח מיסודה של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים Национальная программа НИОКР по квантовым технологиям	2019 год
6.Индия	National Quantum Mission (NQM)	март 2023
7.Канада	Canada's National Quantum Strategy	январь 2023
8.Китай	Программа инноваций в области науки и техники 2016-2030 годы	2015 год
9.Нидерланды	National Agenda on Quantum Technology	2019 год

10.Респ. Корея	Koreas National Quantum Strategy	июнь 2023
13.Россия	Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии»	2019 год
12.Сингапур	Singapore's National Quantum Strategy	май 2024
13.США	H.R.6227 - National Quantum Initiative Act, Закон о национальной квантовой инициативе	декабрь 2018
14.Финляндия	Finnish Quantum Flagship. Shaping a Quantum-Ready Finland	2023
15.Франция	Stratégie nationale sur les technologies quantiques	2021 год
18.Швейцария	Swiss Quantum Initiative (SQI)	ноябрь 2023
17.Япония	Strategy of Quantum Future Industry Development. Vision for Quantum Future Society	апрель 2022

Финансирование квантовых технологий в ведущих странах и их целевые индикаторы, указанные в программах и стратегиях, представлены в таблице 2. 2.

Таблица 2.2 - Финансирование квантовых технологий в ведущих странах мира и их целевые индикаторы

Страна	Финансирование согласно Стратегии	Целевые индикаторы
Австралия	госинвестиции в исследования – <u>2 млрд. долларов</u>	К 2045 году вклад в ВВП страны \$6,1 млрд., включая \$2,4 млрд. в виде общего прироста

1 AUD = 0.636 USD https://ru.investing.com/	(1.27 млрд \$ США) частные инвестиции - 179 миллионов долларов (113 млн \$ США)	производительности. Прямое трудоустройство – 19 400 человек + более 35 000 рабочих мест по экономике.
Великобритания 1GBP = 1,2616 USD https://ru.investing.com/	Фунтов стерлингов: 2013 г. - 270 млн. 2013- 2023 гг.: 1млрд 2023-2033 годы: 2,5 млрд.(\$ 3,15 млрд)	К 2033 году- 1000 аспирантов - в тройке лидеров по качеству публикаций в сфере QT - 15% в мировых частных инвестициях в QT - 15% - доля на глобальном рынке квантовых технологий
Германия	В 2018 году - €650 млн 2021 год- квантовая инициатива на € 2 млрд, в том числе до 2028 года € 1 млрд	
Дания	Более миллиарда крон на период 2023–2027 гг.	
Канада 1 CAD=0.71 USD https://ru.investing.com/	2022 год - \$ 300 млн. (целевое государствен- ное финансирование), всего более 1,1 млрд долларов США с 2012 по 2022 годы	1)Квантовый сектор Канады к 2045 - отрасль стоимостью 139 млрд. долларов - прибыль \$ 42 млрд. - ≈ 200 000 рабочих мест - вклад в ВВП - 3%

		2)Квантовая стратегия (2023) прогнозирует экономическое воздействие в размере 142,4 млрд долларов (99,6 млн долларов США) к 2040 году.
Индия 1INR = 0.115 USD https://ru.investing.com/	730 297 000 долларов США с 2023–2024 по 2030–2031 годы	Разработать квантовые компьютеры среднего масштаба с 20–50 физическими кубитами (3 года), 50–100 физическими кубитами (5 лет) и 50–1000 физическими кубитами (8 лет) на различных платформах, таких как сверхпроводниковые и фотонные технологии
Испания	Первоначальные инвестиции в размере 22 млн евро 8,1 млн евро в рамках проекта Quantum Spain на разработку компьютера	1)Установка квантового компьютера в Барселонском суперкомпьютерном центре на основе технологии сверхпроводящих кубитов; 2)Установка квантовых симуляторов НРС; 3)Обеспечить доступ к квантовому компьютеру и симуляторам НРС через каналы Испанской суперкомпьютерной сети;
Нидерланды	2015 г. - госинвестиции 150 млн евро на 10 лет	В стране работает Quantum Innovation Hub Rijksoverheid, который финансирует

	через университеты и Минобразования и науки. 2019 - частные компании вложили в исследования QuTech более 10 млн евро .	исследования квантовых технологий в размере 615 млн евро через программу Quantum Delta NL.
Республика Корея 1 KRW= 0.00069 USD https://ru.investing.com/	200 миллиардов вон в бюджет НИОКР на 2025 год. 9,8 млрд вон на Q вычисления, 15,4 млрд вон на Q коммуникации и датчики с общим бюджетом проекта в <u>729,2 млрд вон, на 2025–2031 годы.</u> <u>≈ 3 трлн вон с учетом частных инвестиций</u>	1) Повышение технологического уровня Кореи с 65% от стандартов ведущих стран на 2022 год до 80% к 2030 году и 85% к 2035 году. 2) Развивать квантовую рабочую силу, удвоив число экспертов уровня PI с 500 до 1000 к 2030 году и достигнув 2500 к 2035 году 3) Обеспечить финансирование до 2031 года 729,2 млрд вон (503,15 млн \$) госинвестиции и 3 трлн вон (2,07 млрд \$ США) с учетом ГЧП
Россия	2020г. Нацпрограммой "Цифровая экономика" на квантовые вычисления было предусмотрено 3,7 млрд рублей, внебюджетное	Создание к 2024 году отечественного 100-кубитного квантового компьютера

	финансирование со стороны "Росатома" - 2 млрд рублей. До 2024 года было запланировано более 23 млрд рублей	
Сингапур 1SGD = 0,745 USD https://ru.investing.com/	<u>300 млн долларов</u> на 5 лет с 2025 года (223,5 млн \$ США) из плана Сингапура «Исследования, инновации и предпринимательство 2025» (RIE 2025). До 2024 года страна уже инвестировала в QT <u>400 млн долларов</u>	Подготовить <u>100 талантов уровня доктора наук</u> и 100 талантов уровня магистра в течение следующих 5 лет (с 2025 года) для удовлетворения потребностей промышленности и исследований в талантах в области глубоких технологий.
США	1) 1,275 млрд долларов на 5 лет с 2019 по 2023 2) 2,7 млрд долларов на развитие практических приложений QT на 2025-2029 годы	Цели Закона о квантовой инициативе - обеспечить постоянное лидерство Соединенных Штатов в области квантовой информатики и ее технологических приложений
Франция 1EUR=1,045 USD https://ru.investing.com/	На период 2021-2024 годы – 1, 8 млрд. Евро, в том числе 1 млрд. Евро – государственные	- удвоение числа специалистов к по QT до 5000 к 2025 году; - подготовка 1700 молодых исследователей;

	инвестиции. Привлечь 12,5 млрд евро частных инвестиций за 5 лет	- 200 новых диссертаций; - создание 16000 прямых рабочих мест к 2030 году; - обеспечения от 1 до 2% французского экспорта.
Швейцария 1CHF = 1,105 USD https://ru.investing.com/	На 2025-2028 годы: в швейцарских франках 27,5 млн. (33%) - на гранты 14,1 млн. (17%); – целевые инвестиции в инновац. проекты 41,6 млн. (45%) - на поддержку общей инфраструктуры и платформ Всего 83,2 млн CHF (91,8 млн долларов США)	Сохранение превосходства; подготовка рабочей силы, рост конкурентоспособности Швейцарии <i>83,2 млн CHF (91,9 млн \$ США) будут разделены между Швейцарской академией наук (SCNAT), Швейцарским национальным научным фондом и Innosuisse</i>
Япония 1JPY= 0,0067 USD https://ru.investing.com/	По данным Bloomberg, правительство Японии выделило 1,05 трлн иен (7 млрд долларов США) на исследования в области микросхем нового поколения и квантовых вычислений	10 миллионов пользователей квантовых технологий в стране; Благодаря QT производство до 50 триллионов иен; Содействие компаниям - квантовым единорогам создавать рынки будущего.

По данным компании McKinsey, по состоянию на 2022 год общий исторический объявленный объем государственного финансирования квантовых вычислений составил:

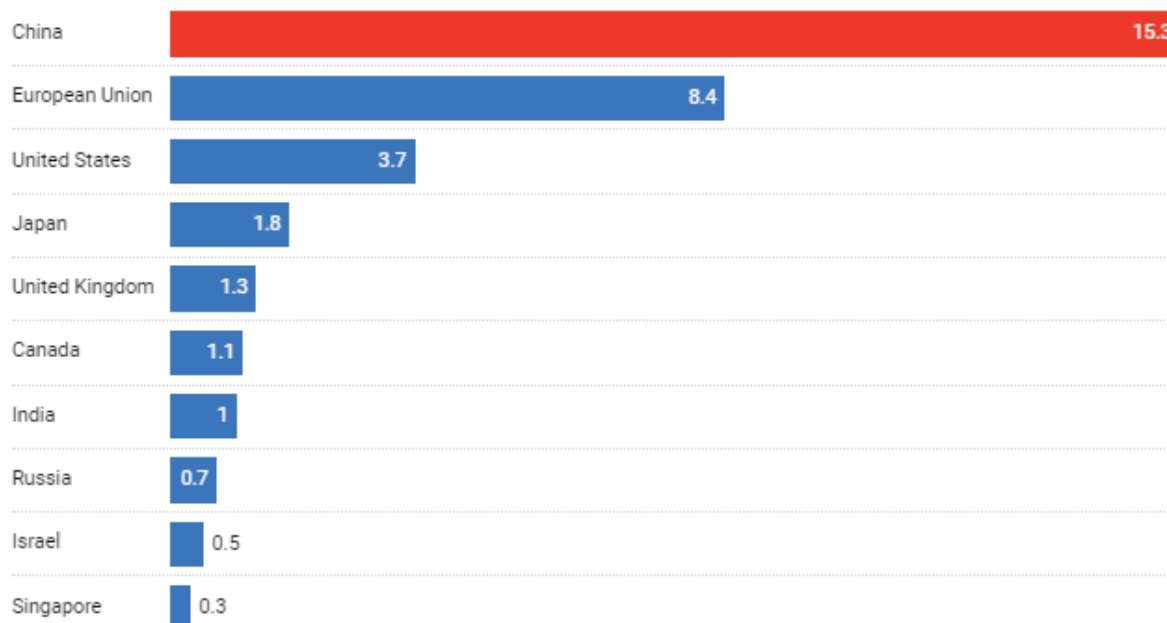
- 1,9 млрд долларов США со стороны США;
- 7,2 млрд долларов США со стороны Европейского союза;
- 15,3 млрд долларов США со стороны Китая [23].

Как подчеркивают эксперты, государственные инвестиции Китая в развитие квантовых технологий в восемь раз превышают государственные инвестиции США, см. рисунок 2.2.

Данный факт вызывает озабоченность аналитиков и государственных деятелей. Европейский институт изучения Китая в конце 2024 года выпустил специальный отчет по развитию квантовых технологий в Китае.

Announced Government Investment in Quantum Technologies through 2022

Billions of US\$



Note: Based on estimates of announced figures.

Source: CSIS China Power Project; McKinsey & Company

Источник: <https://chinapower.csis.org/china-quantum-technology/> [24].

Рисунок 2.2 - Распределение государственных инвестиций в квантовые технологии по странам

Государственные расходы на квантовые технологии в 2022 году по версии ВЭФ представлены на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 –Государственные расходы на квантовые технологии по версии ВЭФ [1].

Сегодняшние лидеры в области квантовых технологий уже разработали целостные квантовые экосистемы, мобилизуя ресурсы, необходимые для того, чтобы оставаться впереди квантовой кривой, отмечают эксперты Всемирного Экономического Форума. Чтобы избежать дальнейшего развития квантового разрыва, страны с более развитыми квантовыми программами должны взять на себя обязательство по обеспечению инклюзивности квантового образования [1].

Европейские учёные отмечают, что «Квантовые вычисления - один из самых конкурентных секторов в мире, сравнимый с борьбой между Соединенными Штатами и Советским Союзом за покорение космоса в 1960-х годах. Первое правительство, освоившее эту технологию, будет иметь преимущество перед остальными, поскольку оно сможет лучше предсказывать, моделировать и анализировать большее количество сценариев, будь то разработка нового лекарства, природная катастрофа или очередной финансовый кризис» [24].

Использованные источники по разделу 2.1

- 1.** The world is heading for a 'quantum divide': here's why it matters, 18.01.2023, <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/the-world-quantum-divide-why-it-matters-davos2023>
- 2.** Презентация Российского квантового центра, представленная в Астане
- 3.** National Quantum Strategy, <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy>
- 4.** Quantum Austria, <https://www.ffg.at/en/quantum-austria>
- 5.** A roadmap for quantum technologies in the UK, <https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Roadmap.pdf>
- 6.** Quantum technologies – from basic research to market, <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Federal-Government-Framework-Programme-Quantum-technologies-2018-bf-C1.pdf>
- 7.** <https://che.org.il/wp-content/uploads/2021>
- 8.** <https://dst.gov.in/national-quantum-mission-nqm>
https://psa.gov.in/CMS/web/sites/default/files/psa_custom_files/VIGYAN%20DHARA_Final%20Version%201_0.pdf
- 9.** National Quantum Science and Technology Institute Scienze e-Techlogie Quantistiche, https://www.mur.gov.it/sites/default/files/202302/D.D.%20341%20_PE0000023_rev131022NF.pdf – Италия
- 10.** Canada's National Quantum Strategy, <https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/sites/default/files/attachments/2022/NQS-SQN-eng.pdf>
- 11.** https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm
- 12.** De Nationale Technologiestrategie, <https://open.overheid.nl/documenten/67b0a9e1-135b-483f-9ed9-3aade270dbce/file>
- 13.** National Agenda on Quantum Technology, 2019 <https://qutech.nl/wp-content/uploads/2019/09/NAQT-2019-EN.pdf>

14. Korea's National Quantum Strategy, https://quantuminkorea.org/wp-content/uploads/2024/06/Korea-National-Quantum-Strategy-2023_c.pdf
15. <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019kvantyi.pdf>
16. Singapore's National Quantum Strategy, <https://nqo.sg/nqs/>
17. H.R.6227-National Quantum Initiative Act, 2018, <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>
18. Finnish Quantum Flagship. Shaping a Quantum-Ready Finland, <file:///C:/Users/service/Downloads/%D0%A4%D0%B8%D0%BD%D0%BB%D1%8F%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D1%8F.pdf>
19. Stratégie nationale sur les technologies quantiques, 2021, https://www.enseignementsuprecherche.gouv.fr/sites/default/files/content_migration/document/Dossier_de_Presse_Presentation_de_la_strategie_nationale_sur_les_technologies_quantiques_1372307.pdf
20. Swiss Quantum Initiative (SQI), <https://portal-cdn.scnat.ch/asset/db805edf-d930-59a7-a4b22871b1fe37/231129%20SQC%20Recommendations%20for%.pdf>
21. Strategy of Quantum Future Industry Development, https://www8.cao.go.jp/cstp/english/strategy_r08.pdf
22. Quantum Computing: Developments in the UK and US? 2024, 09.08.2024, <https://www.insideglobaltech.com/2024/08/09/quantum-computing-developments-in-the-uk-and-us/>
23. <https://chinapower.csis.org/china-quantum-technology/>
<https://portal-cdn.scnat.ch/asset/db805edf-d930-59a7-a407-b22871b1fe37/231129%20SQC%20Recommendations%20for%202025-2028.pdf>
24. How the world map of quantum computing is looking, 2024
<https://www.bbva.com/en/innovation/how-the-world-map-of-quantum-computing-is-looking/>

2.2. Национальная квантовая стратегия Австралии

Технологический сектор Австралии является третьей по величине отраслью промышленности Австралии, в нем работает 1 из 16 работников и он ежегодно вносит в экономику страны 167 миллиардов долларов, или 8,5% ВВП. Сектор быстро растет и, по прогнозам, будет приносить 244 миллиарда долларов в год к 2031 году [1].

Слоган Национальной квантовой стратегии Австралии: *Построение процветающего будущего с помощью квантового преимущества Австралии!*

Правительство Австралии опубликовало **Национальную квантовую стратегию** в мае 2023 года, см. рисунок 2.4. В стратегии излагается долгосрочное видение развития квантовой индустрии в Австралии.

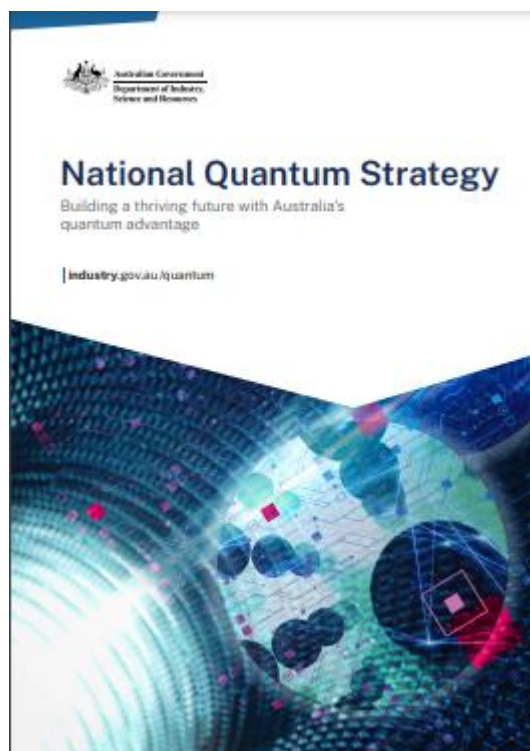


Рисунок 2.4 - Обложка Стратегии Австралии 2023 года [2].

Миссия

В 2030 году Австралия будет признана лидером мировой квантовой индустрии, а квантовые технологии станут неотъемлемой частью процветающей, справедливой и инклюзивной Австралии.

Стратегия, основанная на консультациях

Национальная квантовая стратегия Австралии основана на обширных консультациях с квантовым сектором страны и более широким сообществом на 2022 год. Консультациями руководит главный научный сотрудник Австралии, доктор Кэти Фоули АО PSM, и она включала в себя представления, круглые столы, рабочие группы и заседания муниципалитета. Уровень и качество участия подчеркнули потенциал и стремление сектора к действию. Эти консультации помогли определить ключевые усилия и действия, необходимые для реализации больших возможностей Австралии.

При разработке стратегии опирались на рекомендации Национального консультативного комитета по квантовой механике и вклад правительств штатов и территорий Австралии.

Национальная квантовая стратегия Австралии состоит из 5 центральных тем, каждая тема включает в себя набор действий на 7 лет, см. рисунок 2.5.

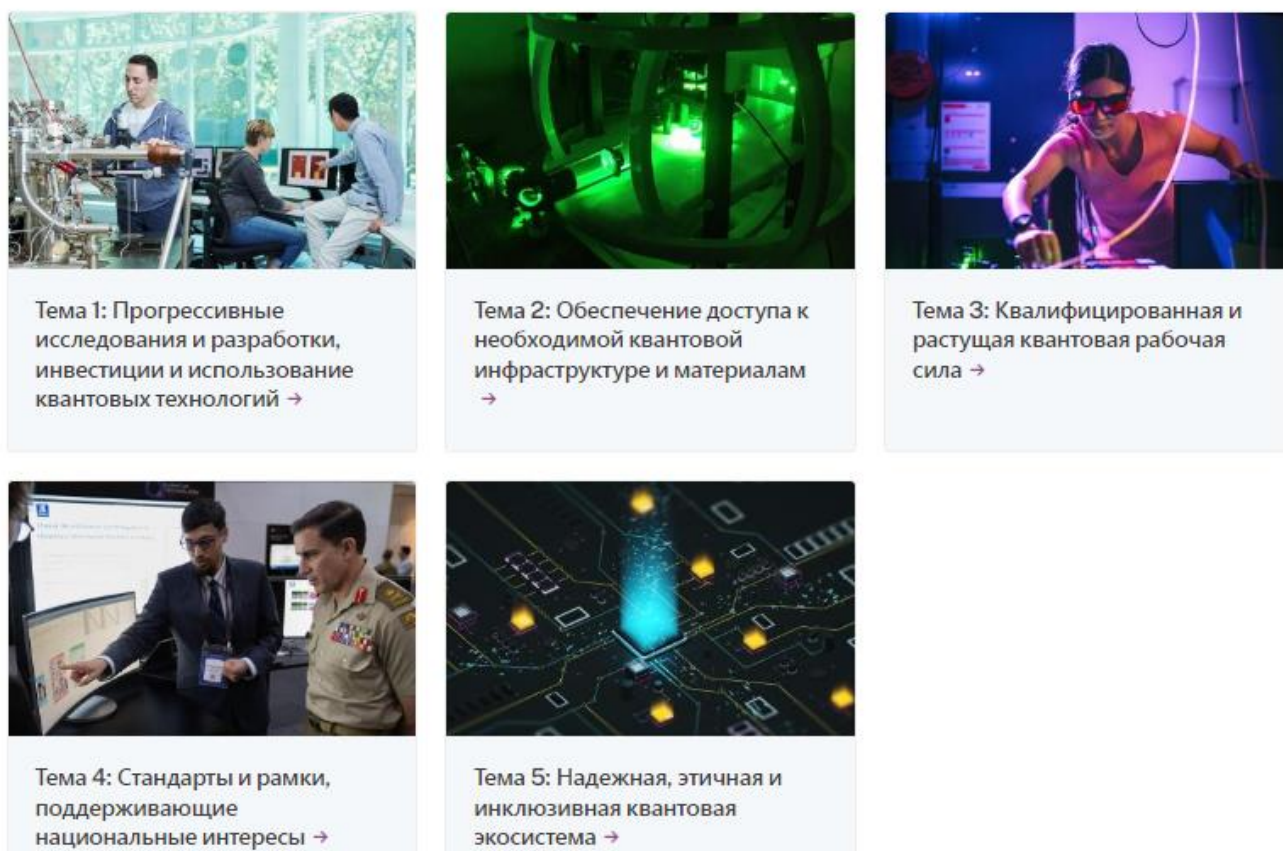


Рисунок 2. 5 - Пять центральных тем квантовой стратегии Австралии, машинный перевод [3].

Рассмотрим темы квантовой стратегии Австралии подробнее.

Тема 1: Успешные исследования и разработки, инвестиции и использование квантовых технологий.

*Создайте сеть квантовых компаний и технологий для потенциальных будущих инвестиций через Национальный фонд реконструкции в размере **15 миллиардов долларов**, при этом минимум 1 миллиард долларов будет выделен на инвестиции в критические технологии.*

Тема 2: Обеспечение доступа к необходимой квантовой инфраструктуре и материалам

Действие 2.1

Проведите национальный аудит инфраструктуры, связанной с квантовыми технологиями, что позволит проводить квантовые исследования. Аудит выявит пробелы в возможностях и области для целевых инвестиций...

Тема 3: Квалифицированная и растущая квантовая рабочая сила.

Предоставить Национальную инициативу по квантовому сотрудничеству и стипендии PhD для талантливых специалистов в области квантовых технологий, чтобы заложить основы общенациональной модели академического сотрудничества. Предусмотрен отчет о рабочей силе quantum, включающий моделирование для определения потребностей в рабочей силе и образовании для сектора quantum и смежных отраслей. Отчет будет включать таксономию навыков для специалистов quantum и других смежных профессий. Интегрировать квантовую науку в программы повышения осведомленности о STEM в школах, университетах и ПОО в сотрудничестве с федеральными органами образования, органами штата и территорий. Это укрепит возможности и будет способствовать освоению quantum и смежных профессий ...

Действие 3.4

Изучить меры по привлечению талантов в области квантовой физики со всего мира и позиционировать Австралию как лучшее направление для построения успешной карьеры в области квантовой физики.

Тема 4: Стандарты и рамки, поддерживающие национальные интересы.

Австралия станет активным участником глобальных органов, устанавливающих стандарты, для содействия разработке стандартов, которые поддерживают процветающую, доступную и безопасную квантовую экосистему. Обеспечить, чтобы нормативная база Австралии стимулировала исследования, связанные с квантовыми технологиями, поддерживала инвестиции в квантовые компании и поддерживала экспорт, защищая национальные интересы Австралии.

Тема 5: Надежная, этичная и инклюзивная квантовая экосистема.

Австралия уже добилась прорывов в таких областях, как:

- квантовая оптика;
- атомная физика;
- квантовая теория;
- полупроводниковые и сверхпроводящие
Устройства;
- точное определение времени;
- кибербезопасность.

Приоритеты по развитию технологий в Австралии с 2022 года

На 1 этапе (5 лет)

- Постквантовая криптография;
- Датчики квантовые времени;
- Квантовая генерация случайных чисел;
- Распределение квантовых ключей;
- Квантовый компьютер (симуляторы).

2 этап (5-10 лет)

- Квантовые инерциальные датчики;
- Квантовые электромагнитные датчики;
- Квантовые сети;
- Более сложные квантовые компьютеры.

3 этап (10-20 лет)

- Визуализация с запутанными фотонами;
- Отказоустойчивый программируемый квантовый компьютер

4 этап (20 лет)

- Квантовая инженерии;
- Криптографические значимые с помощью отказоустойчивых квантовых компьютеров с универсальными вентилями.

В стране создан специальный ресурс по квантовым технологиям - Квантовая Австралия (Quantum Australia). В основе этики Quantum Australia лежит стремление содействовать справедливому и этичному квантовому сектору.

Австралия широко развивает международное сотрудничество, больше всего она сотрудничает в области квантовых исследований со следующими странами: Китай, США, Великобритания, Германия и Япония [4].

С полным текстом квантовой стратегии Австралии (машинный перевод на русский язык) можно ознакомиться на сайте Национальной Академии наук при Президенте РК [5].

Использованные источники по разделу 2.2

1. National Quantum Strategy, 1. The National Quantum Strategy is the Australian Government's plan to grow the quantum industry in Australia, <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy>
2. National Quantum Strategy: Building a thriving future with Australia's quantum advantage, <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2023-05/national-quantum-strategy.pdf>
3. Executive summary, <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy/executive-summary>
4. Quantum technologies, <https://www.industry.gov.au/publications/list-critical-technologies-national-interest/quantum-technologies>
5. https://ru.qazscience.gov.kz/wp-content/uploads/2024/12/Australia_QS_ru.pdf

2.3. Национальная квантовая стратегия Великобритании

2015 год

Доктор Тревор Кросс из Великобритании, председатель Группы по особым интересам Quantum Technologies, Член Стратегического Quantum Technologies отмечает - «По всему миру работают более 7000 исследователей, а ежегодные инвестиции составляют 1,5 млрд евро. Сейчас самое время превратить эту работу в новые продукты и услуги, которые могли бы изменить нашу жизнь и стимулировать значительный экономический рост в Великобритании» [1].

Правительство Великобритании в 2013 году признало эту возможность, когда объявило об инвестициях в **270 миллионов фунтов** стерлингов в Национальную программу квантовых технологий на пять лет.

Стратегическому консультативному совету по квантовым технологиям было предложено поддержать эти усилия и сотрудничать с партнерами из Департамента бизнеса, инноваций и навыков, Исследовательского совета по инженерным и физическим наукам, Innovate UK, национальной физической лабораторией, Лабораторией оборонной науки и техники и CESG (национальный технический орган по обеспечению информации) для продвижения программы.

Первую Национальную программу поддерживал Стратегический консультативный совет по квантовым технологиям (QT SAB), который опубликовал национальную стратегию в области квантовых технологий в 2015 году. Британская программа "Квантовые технологии" была направлена на защиту интеллектуальной собственности и обеспечение совместной работы всех специалистов в этой области для создания эффективной цепочки поставок. Публикация дорожной карты является частью Стратегии.

Дорожная карта для квантовых технологий в Великобритании была принята ещё в сентябре 2015 года, см. 2.6.

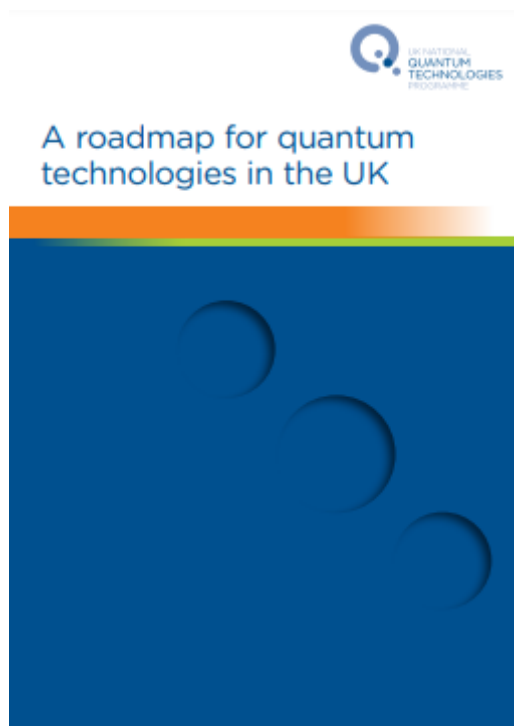


Рисунок 2.6 – Дорожная карта по квантовой стратегии Великобритании [1].

Отдельные дорожные карты разработаны по следующим направлениям:

- Компонентные технологии;
- Квантовые датчики;
- Квантовые инерциальные датчики;
- Квантовые коммуникации;
- Квантово улучшенная визуализация;
- Квантовый компьютер.

При этом в дорожной карте предусмотрено:

- Создание прочной основы для развития потенциала в Великобритании;
- Выращивание квалифицированной рабочей силы в области квантовых технологий;
- Создание правильного социального и нормативного контекста;
- Максимизация выгод Великобритании за счет международного взаимодействия.

На краткосрочный период (0-5 лет)

- компоненты для квантовых систем;
- квантовые часы;
- немедицинские технологии визуализации (электромагнитные, гравитационные тепловизоры, однофотонная визуализация);
- квантовая безопасная связь (двухточечная безопасная связь).

На среднесрочный период (5-10 лет)

- технологии медицинской визуализации;
- навигация (точная инерциальная навигация);
- компоненты второго поколения (твердотельные, миниатюрные, автономные квантовые устройства, например акселерометры).

Лаборатории обороны, науки и технологий Великобритании (Dstl) опубликовали документ о ландшафте квантовых технологий Великобритании в феврале 2014 года. В нем были изложены ключевые области применения, которые они рассматривали как потенциально важные для обороны в ближайшие 3-10 лет. В обзоре были предложены четыре приложения для дальнейшего изучения:

- квантовые часы;
- квантовые коммуникации;
- квантовые датчики;
- квантовое моделирование.

В нем также упоминались вычисления и еще один набор вспомогательных технологий, таких как молекулярные и твердотельные разработки, имеют потенциальное экономическое или социальное значение.

В Великобритании в дорожной карте предусмотрена специализация университетов по различным направлениям.

Так, квантовый центр в Quantum специализируется на улучшенной визуализации (QuantIC). Этот центр возглавляется Университетом Глазго и специализируется на визуализации с квантовым улучшением. Он использует квантовые корреляции, запутанность и синхронизацию для создания изображений с использованием новых методов. Это включает в себя визуализацию с использованием очень низких уровней освещенности, позволяющих визуализировать объекты, "скрытые" вне прямой видимости, визуализацию с улучшенным разрешением с использованием квантовых корреляций, визуализацию с использованием только небольшого количества фотонов и "скрытую" визуализацию. Квантовые эффекты также будут использоваться для извлечения изображений из зашумленных сигналов. Центр занимается развитием цепочки поставок для этих устройств, и будет работать над разработкой базовых технологий, таких как источники одиночных фотонов и матрицы детекторов, микроэлектромеханические системы (MEMS) и нано-электромеханические системы (NEMS) [1].

Сеть передачи знаний в Великобритании

Сеть передачи знаний и Группа по особым интересам в области квантовых технологий. Сеть передачи знаний (KTN) Quantum Группа по особым интересам в области технологий (QT SIG) и руководящая группа quantum technologies будут играть ключевую роль в качестве связующего звена и посредника. QT SIG был создан KTN для дальнейшего использования квантовых технологий путем повышения осведомленности среди потенциальных пользователей и подключения рынков к поставщикам [1].

Обучение

Были созданы три центра подготовки докторантов, имеющих прямое отношение к квантовым технологиям (многие другие имеют косвенное отношение):

- Управляемая квантовая динамика, Имперский колледж Лондона;
- Квантовая инженерия, Бристольский университет;
- Внедрение квантовых технологий, Университетский колледж Лондона.

Как промышленность, так и научные круги должны играть определенную роль в обучении.

Публичность и освещение в средствах массовой информации

Сообщество квантовых технологий должно продвигать последовательное и вдохновляющее послание организациям средств массовой информации, чтобы гарантировать, что **осведомленность и понимание общественности развиваются параллельно с технологией**. Программа квантовых технологий и Quantum Hubs будут работать со средствами массовой информации, чтобы повысить осведомленность о программе во всем мире.

2023 год

Новый политический документ по квантовым технологиям был опубликован в Великобритании в марте 2023 года и включает 4 цели:

Цель 1: Ведущие мировые исследования и навыки.

Цель 2: Поддержка бизнеса.

Цель 3: Стимулирование внедрения квантовых технологий в Великобритании.

Цель 4: Лидерство в квантовом регулировании и защита сектора [2].

Развитие квантовых технологий широко поддерживается правительством Великобритании, см. вставку 2.1.

Вставка 2.1

Министр Великобритании по науке, инновациям и технологиям о роли квантовых технологий (машинный перевод)

В 2023 году правительство создало Департамент по науке, инновациям и технологиям (DSIT) для реализации нашей миссии - стать самой инновационной экономикой в мире и сверхдержавой науки и технологий. **Квантовые технологии лежат в основе этой миссии**, не только как одна из пяти приоритетных технологий завтрашнего дня - квантовая, ИИ, инженерная биология, полупроводники, будущие телекоммуникации, - но и как технология, которая может раскрыть весь потенциал любой другой в этом списке.

Великобритания уже является мировым лидером в области квантовых

технологий. В 2014 году мы создали Национальную программу квантовых технологий, первую в своем роде в мире, для поддержки превосходных исследований и начала вывода технологий из исследовательской среды. Высоко кооперативное квантовое сообщество Великобритании отражает это предвидение почти десятилетней давности.

Эта национальная стратегия устанавливает наши новые десятилетние амбициозные обязательства в отношении квантовых технологий в Великобритании ... мы более чем удваиваем наши инвестиции в квант, инвестируя **2,5 миллиарда фунтов стерлингов** в квант в течение следующих десяти лет, с целью привлечения значительных дополнительных частных инвестиций сверх этого.

Мишель Донелан - министр по науке, инновациям и технологиям UK

Источник: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage>

Великобритания инвестировала в квантовые навыки, финансирует аспирантские исследования и стипендии, и имеет некоторых из ведущих мировых экспертов в области квантовой механики. Талант - ключевой фактор для поиска квантового бизнеса в Великобритании.

В Великобритании быстрорастущий квантовый сектор, страна занимает второе место в мире после США по количеству квантовых компаний и второе место по привлечению частных инвестиций, лидируя в конкуренции в Европе.

Правительство профинансировало 139 проектов с участием 141 квантовой организации только через Innovate UK Commercialising Quantum Challenge.

Правительственное видение заключается в том, чтобы к 2033 году Великобритания стала ведущей экономикой, основанной на квантовых технологиях. Цели Стратегии до 2033 года представлены ниже.

1) Гарантировать, что Великобритания станет домом для ведущих мировых квантовых наук и инженерии, увеличив знания и навыки в Великобритании:

Позиция Великобритании сегодня	Цель 2033 года
Среди 10 ведущих стран, выпускающих научные результаты в области квантовой науки, Великобритания занимает 3-е место по качеству и влиянию своей квантовой науки. (На основе взвешенного по отраслям цитирования за 2017–2021 гг.).	К 2033 году мы сохраним позицию в тройке лидеров по качеству наших публикаций в области квантовой науки, одновременно увеличив объем наших исследовательских публикаций.
С 2014 года Великобритания профинансировала более 470 аспирантов, работающих в области квантовых технологий или смежных дисциплин.	К 2033 году мы профинансируем дополнительно 1000 аспирантов, обучающихся по дисциплинам, связанным с квантовой физикой.
Двусторонние соглашения с США о квантовом сотрудничестве.	К 2033 году у нас будут двусторонние соглашения с пятью ведущими странами в области квантовых технологий, основанные на содержательных программах совместной работы.

(машинный перевод)

Источник: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

2) Поддержка бизнеса, делающая Великобританию популярным местом для квантового бизнеса и неотъемлемой частью глобальной цепочки поставок, а также предпочтительным местом для инвесторов и международных талантов:

Позиция Великобритании сегодня	Цель 2033 года
Великобритания привлекла около 12% мировых частных инвестиций в компании, занимающиеся квантовыми технологиями (2012–22 гг.).	К 2033 году доля Великобритании в мировых частных инвестициях в компании, занимающиеся квантовыми технологиями, составит 15%.
В настоящее время доля Великобритании на мировом рынке квантовых технологий оценивается примерно в 9% (2021/22).	К 2033 году доля Великобритании на мировом рынке квантовых технологий составит 15%.

(машинный перевод)

Источник: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

3) Стимулировать использование квантовых технологий в Великобритании для обеспечения преимуществ для экономики, общества и национальной безопасности:

Позиция Великобритании сегодня	Цель 2033 года
25%–33% предприятий предприняли конкретные шаги по подготовке к приходу квантовых вычислений.	К 2033 году все предприятия в ключевых секторах Великобритании будут осведомлены о потенциале квантовых технологий, а 75% соответствующих предприятий предпримут шаги по подготовке к появлению квантовых вычислений.

(машинный перевод)

Источник: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

4) Создать национальную и международную нормативную базу, которая поддерживает инновации и этическое использование квантовых технологий, а также защищает возможности Великобритании и национальную безопасность

Позиция Великобритании сегодня	Цель 2033 года
Квантовое регулирование и рамки стандартов еще предстоит определить	Великобритания станет мировым лидером в установлении мировых стандартов для квантовых вычислений.

(машинный перевод)

Источник: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

В стране функционирует Национальный центр квантовых вычислений (NQCC), создано новое научно-исследовательское учреждение, финансируемое через UKRI, которое занимается разработкой масштабируемого квантового компьютера в Великобритании. Есть Институт квантовой метрологии при Национальной физической лаборатории (NPL), который обеспечивает национальный потенциал для тестирования, оценки и ускорения коммерциализации квантовых технологий, а также руководит NQTP в разработке международных стандартов.

Разработан специальный ресурс по программе квантовых технологий. На ресурсе размещены достижения Великобритании в реализации квантовой стратегии на начало 2025 года, см. рисунок 2.7.



(Машинный перевод)

Источник: <https://uknqt.ukri.org/>

Рисунок 2.7 – Достижения Великобритании в развитии квантовых технологий на конец 2024 года

Видение Великобритании по развитию квантовых технологий, изложенное в 2023 году:

Миссия 1

К 2035 году в Великобритании появятся доступные квантовые компьютеры, способные выполнять 1 триллион операций и поддерживать приложения, которые обеспечат преимущества, значительно превосходящие преимущества классических суперкомпьютеров в ключевых секторах экономики.

Миссия 2

К 2035 году Великобритания развернет самую передовую в мире масштабную квантовую сеть, став пионером будущего квантового интернета.

Миссия 3

К 2030 году каждый фонд NHS получит выгоду от решений на основе квантовых датчиков, помогая людям с хроническими заболеваниями жить более здоровой и долгой жизнью за счет ранней диагностики и лечения.

Миссия 4

К 2030 году на самолетах будут установлены квантовые навигационные системы, включая часы, что обеспечит точность следующего поколения для устойчивости, не зависящую от спутниковых сигналов.

Миссия 5

К 2030 году мобильные сетевые квантовые датчики откроют новые возможности ситуационной осведомленности, которые будут использоваться в критически важной инфраструктуре в транспортном, телекоммуникационном, энергетическом и оборонном секторах.

Использованные источники по разделу 2.3

1. A roadmap for quantum technologies in the UK, <https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Roadmap.pdf>
2. National quantum strategy UK, 15.03.2023, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>
3. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6411a602e90e0776996a4ade/national_quantum_strategy.pdf
4. <https://uknqt.ukri.org>

2.4. Федеральная программа Германии по развитию квантовых технологий

В 2018 году Федеральное правительство Германии объявило о Рамочной программе по выводу квантовых технологий на рынок, а также выделило €650 миллионов на финансирование своей программы квантовых технологий. Целью программы является создание рамочных условий для подготовки к новым экономическим возможностям и рынкам. Кроме того, два года спустя правительство Германии объявило о квантовой инициативе на €2 млрд, добавив к намерениям ЕС инвестировать €1 млрд в этот сектор до 2028 года [1].

Квантовые технологии – от фундаментальных исследований до выхода на рынок. Рамочная программа Федерального правительства [2]. Первая страница программы представлена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8– Обложка Программы по развитию квантовых технологий в Германии 2018 года [2].

В преамбуле к Программе отмечается, что Германия и ЕС имеют хорошую базу для развития квантовых технологий: Европа является международным лидером области квантовой физики, на ее долю приходится около 50% всех научных

публикаций и почти 40% исследований авторов в этой области, в то время как сама Германия может претендовать на сильную экспертизу в области квантовой физики, что дает ей отличные возможности стать одним из первых лидеров в области преобразования квантовых технологий второго поколения [2].

Основные направления развития квантовых технологий в Германии согласно Рамочной программе:

- 1) Квантовые компьютеры;
- 2) Квантовая коммуникация;
- 3) Технология измерения на основе квантовых технологий;
- 4) Стимулирующие технологии для квантовых систем [2].

По первому направлению отмечается, что путь к созданию квантовых компьютеров сложный, и он также включает в себя разработку специальных алгоритмов. Для исследования квантовых алгоритмов нет необходимости в существовании квантовых компьютеров, поскольку алгоритмы могут быть смоделированы, о крайней мере до определенной степени (и до определенного размера), с помощью обычных цифровых компьютеров. Фактически, есть еще одна причина, по которой моделирование важно: в настоящее время все еще обсуждаются очень разные аппаратные платформы и архитектуры для квантовых компьютеров, и необходимо проанализировать и сравнить их преимущества или недостатки для квантовых алгоритмов, использующих традиционные компьютеры [2].

По второму направлению в документе отмечается, что устройства **QKD** были коммерчески доступны для определенных нишевых рынков в течение некоторого времени. Типичными клиентами в настоящее время являются банки или правительства. Подавляющее большинство подходов к квантовому обмену ключами основаны на обмене фотонами по оптическим

волоконам. Однако при текущем уровне техники возможно создавать приложения, основанные на двухточечных соединениях, только на расстояниях менее 100 километров.

Космическая лазерная связь представляет собой способ преодоления проблем, связанных с разрушительными атмосферными воздействиями, и в этой области уже достигнут значительный прогресс в ходе испытаний в реальных условиях. Лазерные коммуникационные технологии с использованием квантовой криптографии были успешно испытаны летающим объектом под атмосферным условиям ещё в 2015 году. Все еще остается ряд открытых технологических вопросов о реализации на значительно больших расстояниях и создании конкретных приложений, поскольку слабые световые сигналы от квантовой связи не могут быть обработаны с помощью обычных усилителей. Однако интеграция космического квантового распределения ключей может оказаться полезной при развитии межконтинентальных связей [2].

По третьему направлению в программе отмечается, что хрупкость квантовых состояний и систем таит в себе огромные возможности для измерительных технологий. Уязвимость к воздействиям окружающей среды есть не что иное, как высокая чувствительность к измерениям. Атомные часы, основанные на квантовых состояниях атомов, уже десятилетиями используются в качестве отсчета времени для точных измерений, например, как часть европейской навигационной системы Galileo или глобальной системы позиционирования (GPS) для навигации. Квантовые гравиметры, основанные на интерферометрии холодных атомов, способны обнаруживать даже мельчайшие изменения в гравитационном поле Земли, вызванные различным составом материала, расположенным в земной коре. Одним из возможных применений таких сверхточных гравиметров является обнаружение природных ресурсов. Миниатюризация и значительное снижение затрат может быть на горизонте благодаря новым квантовым сенсорам, которые сможет принимать и сохранять их квантовое состояние даже при комнатной температуре [2].

По четвертому направлению «Стимулирующие технологии для квантовых систем» речь идет о переходе от лабораторных установок к надежному оборудованию и стимулированию промышленных инженерных решений.

Федеральное правительство Германии берет на себя обязательства обеспечить **политическую поддержку и руководство** для перехода от научных исследований в области квантовой физики к новым приложениям, основанным на квантовых технологиях.

Целями федерального правительства в рамках текущей федеральной программы на период до 2022 являются:

Инициативы Федерального правительства

- 3.1 Развитие исследовательского ландшафта в области квантовых технологий
- 3.2 Создание исследовательских сетей для новых приложений
- 3.3 Повышение конкурентоспособности промышленности
- 3.4 Обеспечение безопасности и технологического суверенитета
- 3.5 Формирование международного сотрудничества
- 3.6 Вовлечение населения Германии [2].

В документе отмечается **дефицит координации** между научно-исследовательскими организациями и то, что синергетические эффекты используются недостаточно. «Мы должны работать над структурными улучшениями, чтобы установить перекрестные связи и **объединить компетенции**» - отмечается в Программе. Федеральное правительство Германии поручит соответствующим неуниверситетским исследовательским организациям и департаментским исследовательским институтам разработать от его имени предложения по реструктуризации с целью уделить большее внимание прикладным исследованиям в области квантовых технологий [2].

Отдельный раздел в Программе посвящён значению исследовательского портала по квантовым технологиям для накопления целевых знаний по квантовым технологиям и их использованию на практике.

Программой предусмотрено создание **Центра передового опыта или Центра превосходства** в области квантовых технологий при Национальном институте физики Германии (Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB)

Также большое внимание уделяется созданию основ для понимания значения квантовых технологий широким кругом общественности, этому посвящён целый подраздел.

Немецкое правительство создало несколько исследовательских институтов и центров передового опыта, посвященных квантовым вычислениям и смежным областям. Например, Общество Фраунгофера основало Институт прикладной и комплексной безопасности Фраунгофера (AISEC), чтобы сосредоточиться на исследованиях в области квантовой криптографии и других аспектах квантовой безопасности [1].

В мае 2023 года Правительство Германии сообщило, что инвестирует **3,3 миллиарда долларов** в «концепцию действий по квантовым технологиям», которая включает план по разработке собственного универсального квантового компьютера емкостью 100 кубитов уже к 2026 году [3].

По данным немецких СМИ, Германия стремится догнать уровень квантового развития США и Китая. Правительство планирует распределить 1,5 млрд долларов ведущему научно-исследовательскому министерству и 882 млн долларов финансируемым государством научно-исследовательским учреждениям [3].

По словам немецкого министра исследований Беттины Штарк-Ватцингер, развитие квантовых технологий имеет важное значение для обеспечения технологического лидерства Германии. Создание квантового компьютера направлено на стимулирование дополнительной финансовой поддержки сектора.

«С помощью этого плана действий мы в Германии хотим закрепить за собой лидирующие позиции в мире в области квантовых технологий и наш технологический суверенитет», - сказала она [3].

В концептуальном документе говорится, что к 2026 году квантовый компьютер Германии должен иметь не менее 100 кубитов, а «в среднесрочной перспективе» их число должно вырасти **до 500**.

Правительство Германии также инвестировало в разработку аппаратного и программного обеспечения для квантовых вычислений, уделяя особое внимание созданию сильной экосистемы стартапов, а также малых и средних предприятий (МСП) в этой области [3].

С полным текстом федеральной программы Германии по квантовым технологиям (машинный перевод на русский язык) можно ознакомиться на сайте Национальной Академии наук при Президенте РК [4].

Использованные источники по разделу 2.4

1 <https://thequantuminsider.com/2023/04/11/a-brief-overview-of-quantum-computing-in-germany/>

2. Quantum technologies –from basic research to market A Federal Government Framework Programme,
<https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Federal-Government-Framework-Programme-Quantum-technologies-2018-bf-C1.pdf>

3. Germany Launches \$3.3B Quantum Technology Plan, 05.05.2023,
<https://www.iotworldtoday.com/industry/germany-launches-3-3b-quantum-technology-plan>

4. https://ru.qazscience.gov.kz/wp-content/uploads/2024/12/Germany_QS_ru.pdf

2.5 Национальная квантовая миссия (NQM) Индии

По официальной информации Департамента науки и технологий Индии Кабинет министров Индии 19 апреля 2023 года одобрил Национальную квантовую миссию (NQM) общей стоимостью 6003,65 крор рупий на период с 2023-2024 по 2030-2031 годы.



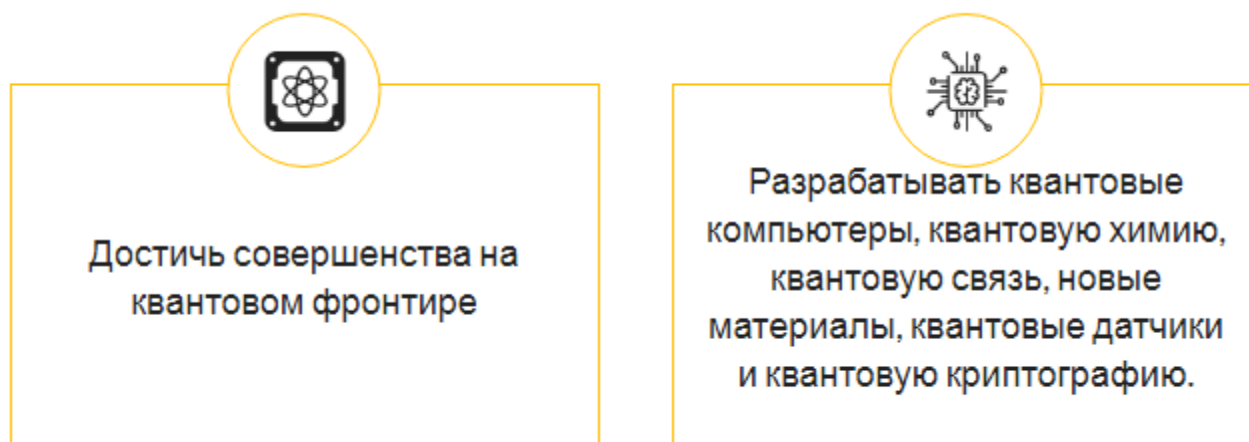
Источник: <https://www.psa.gov.in/mission/national-quantum-mission/26>

Миссия направлена на зарождение, развитие и масштабирование научных и промышленных НИОКР и создание яркой и инновационной экосистемы в области квантовых технологий (QT). Это ускорит экономический рост, основанный на QT, поддержит экосистему в стране и сделает Индию одной из ведущих стран в разработке квантовых технологий и приложений (QTA), отмечается в документе.

Цели миссии включают разработку квантовых компьютеров среднего масштаба с 50-1000 физических кубитов за 8 лет на различных платформах, таких как сверхпроводящие и фотонные технологии. Спутниковая защищенная квантовая связь между наземными станциями на расстоянии 2000 километров в пределах Индии, защищенная квантовая связь на большие расстояния с другими странами, распределение квантовых ключей между городами на расстоянии

более 2000 км, а также многоузловые квантовые сети с квантовой памятью также являются некоторыми из результатов миссии [1].

Цели Миссии представлены на рисунке 2.9.



Источник: <https://dst.gov.in/national-quantum-mission-nqm>

Рисунок 2.9 - Цели квантовой миссия (NQM) Индии, машинный перевод

Национальная квантовая миссия Индии сосредоточена на разработке магнитометров с высокой чувствительностью в атомных системах и атомных часах для точного измерения времени, связи и навигации. Она также будет поддерживать проектирование и синтез квантовых материалов, таких как сверхпроводники, новые полупроводниковые структуры и топологические материалы для изготовления квантовых устройств. Источники/детекторы одиночных фотонов и источники запутанных фотонов также будут разрабатываться для квантовых коммуникаций, зондирования и метрологических приложений [1].

Реализация миссии включает создание четырех тематических центров (Т-Hub) в ведущих академических и национальных научно-исследовательских институтах в следующих областях:

1. Квантовые вычисления;
2. Квантовая коммуникация;
3. Квантовое зондирование и метрология;
4. Квантовые материалы и устройства.

NQM имеет потенциал поднять экосистему развития технологий страны на уровень глобальной конкурентоспособности. Миссия принесет большую пользу различным секторам, включая связь, здравоохранение, финансы, энергетику, в разработке лекарств, космос, банковское дело, безопасность и т. д.

Миссия также даст огромный толчок национальным приоритетам, таким как Digital India, Make in India, Skill India и Stand-up India, Start-up India, Self-reliant India и Цели устойчивого развития (SDG), отмечается в документе [1].

Национальная квантовая миссия Индии рассчитана на восемь лет. Однако реализация в целом имеет три временных шкалы, а именно 3 года, 5 лет и 8 лет.

Ниже приведены конкретные цели и задачи миссии:

1. Разработать квантовые компьютеры среднего масштаба с 20–50 физическими кубитами (3 года), 50–100 физическими кубитами (5 лет) и 50–1000 физическими кубитами (8 лет) на различных платформах, таких как сверхпроводниковые и фотонные технологии.
2. Разработать защищенную квантовую связь на основе спутников между двумя наземными станциями на расстоянии до 2000 километров в пределах Индии, а также защищенную квантовую связь на большие расстояния с другими странами.
3. Разработать межгородское распределение квантовых ключей на расстояние более 2000 км с доверенными узлами, использующими мультиплексирование с разделением по длине волны на существующем оптоволокне.
4. Разработать многоузловую квантовую сеть с квантовой памятью, обменом запутанностью и синхронизированными квантовыми повторителями в каждом узле (2–3 узла).
5. Измерения гравитации с чувствительностью лучше 100 нанометров/секунду² с использованием атомов и атомных часов с дробной нестабильностью 10^{-19} для точного времени, связи и навигации.
6. Разработка и синтез квантовых материалов, таких как сверхпроводники, новые полупроводниковые структуры и топологические материалы для

изготовления квантовых устройств и квантовых коммуникационных приложений, источников/детекторов одиночных фотонов, источников запутанных фотонов для квантовых коммуникаций, сенсорных и метрологических приложений [2].

Таким образом, основными областями исследований и разработок, на которых сосредоточены усилия в рамках квантовой миссии Индии, являются квантовые вычисления, квантовая связь, квантовые датчики и метрология, а также квантовые материалы и устройства.

Реализация миссии основана на широком международном сотрудничестве, в том числе с Израилем [3].

Департамент науки и технологий (DST) назначен основным учреждением-исполнителем квантовой Миссии. Предвидя стратегический императив квантовых технологий, DST ещё в марте 2019 года активно инициировал программу Quantum Enabled Science & Technology (QuEST) [4].

Ключевые инициативы Индии по квантовым технологиям в 2024 году представлены в публикации [5].

Использованные источники по разделу 2.5

1. <https://www.psa.gov.in/mission/national-quantum-mission/26>
2. Parliament Question: National Quantum Mission, 2019, <https://pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=2083199>
3. India's National Quantum Mission Invites Israeli Startups: Building Global Partnerships For Quantum Technology's Future, 06.12.2024, <https://thequantuminsider.com/2024/12/06/indias-national-quantum-mission-invites-israeli-startups-building-global-partnerships-for-quantum-technologys-future/>
4. https://psa.gov.in/CMS/web/sites/default/files/psa_custom_files/VIGYAN%20DHAR A_Final%20Version%201_0.pdf
5. Quantum Computing In India: Ecosystem Growth & Key Initiatives In 2024, 27.11.2024, <https://thequantuminsider.com/2024/11/27/quantum-computing-advancements-in-india/>

2.6 Национальная квантовая стратегия (NQS) Канады

13 января 2023 года министр инноваций, науки и промышленности Канады Франсуа-Филипп Шампань представил Национальную квантовую стратегию в Институте Perimeter. Канада – лидер квантовых технологий, отмечается в квантовой стратегии Канады, см. рисунок 2.10.

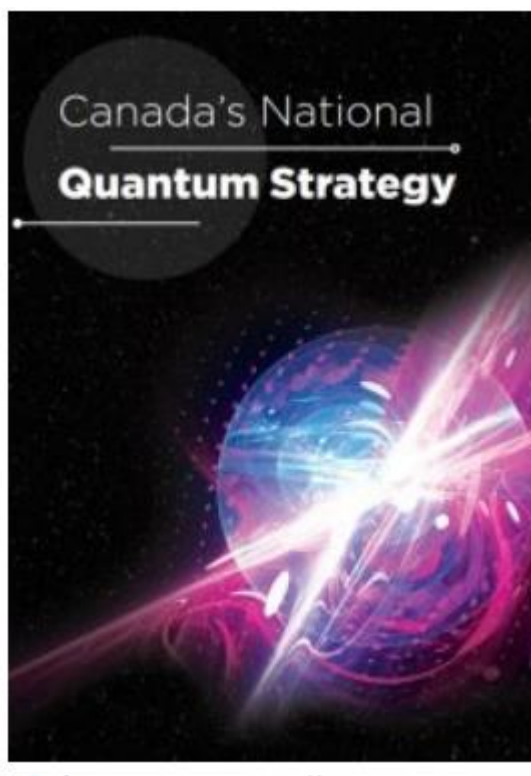


Рисунок 2.10 - Главная страница Квантовой стратегии Канады [1]

Национальная квантовая стратегия (NQS) Канады устанавливает три ключевые миссии для обеспечения того, чтобы Канада оставалась на пути квантовых инноваций и лидерства:

- Сделать Канаду мировым лидером в постоянной разработке, внедрении и использовании аппаратного и программного обеспечения для квантовых вычислений – на благо канадской промышленности, правительств и граждан.
- Обеспечить конфиденциальность и кибербезопасность канадцев в мире с поддержкой квантовой технологии с помощью национальной безопасной сети квантовых коммуникаций и инициативы по постквантовой криптографии.

- Дать возможность правительству Канады и ключевым отраслям промышленности стать разработчиками и первыми пользователями новых технологий квантового зондирования [1].

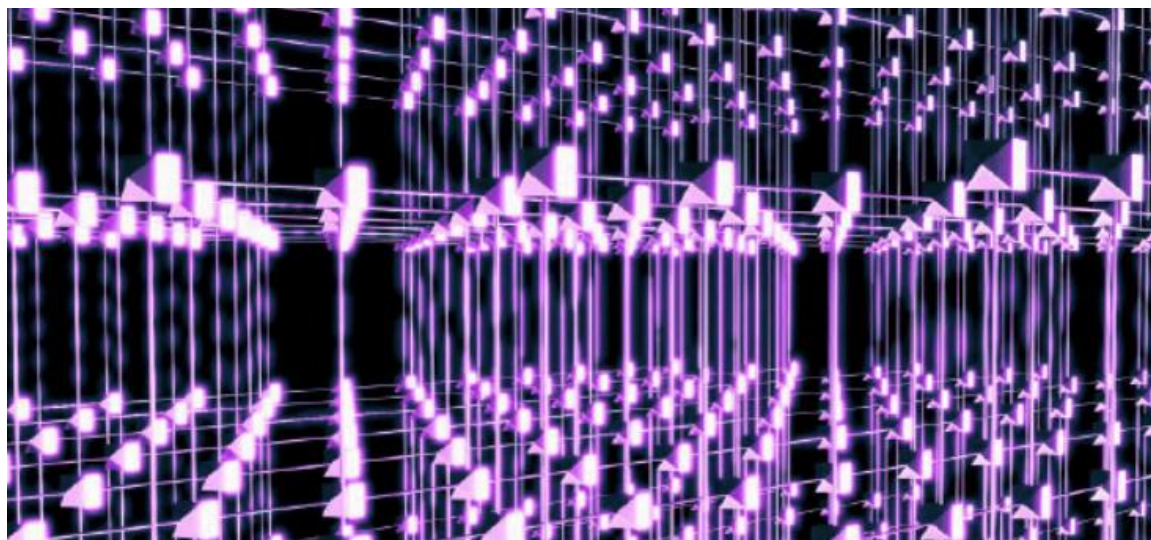
Четыре ключевые области

- Исследование
- Талант
- Коммерциализация
- Безопасность

Канада занимала лидирующие позиции благодаря инвестициям в квантовую науку на протяжении многих десятилетий, включая более 1 миллиарда долларов в период с 2012 по 2022 год. Кроме того, с 2002 года частные инвесторы и филантропы выделили более 1 миллиарда долларов на квантовую науку, инновации и компании, отмечается в документе.

Правительство Канады выделило дополнительные 360 миллионов долларов в течение семи лет, начиная с 2021-22 годов, для поддержки реализации стратегии.

В стране создана экосистема, центры квантовой экспертизы мирового уровня.



Представляет интерес опыт Канады по распределению ролей при реализации Квантовой Стратегии:

Правительство - Финансирование, снижение рисков и создание поддерживающих политических рамок для новых технологий, организация и координация, закупка товаров и услуг и выполнение функций партнера по исследованиям.

Академия наук - Развитие талантов, проведение крупномасштабных прикладных исследований и разработок (R & D), и расширение границ знаний.

Промышленность - Вывод новых технологий на рынок, подключение к глобальным цепочкам поставок, экспорт квантовых продуктов и услуг и внедрение новых технологий.

Некоммерческий сектор - Организация и координация мероприятий в поддержку квантовых исследований и коммерциализации, включая образование, осведомленность, ускорение и инкубацию, а также проведение адвокации [1].

Канада выделила в Стратегии пять широких категорий квантовых технологий:

- Квантовые компьютеры;
- Квантовое программное обеспечение;
- Квантовые коммуникации;
- Квантовые датчики;
- Квантовые материалы.

Ключевые факторы реализации стратегии

- Критическая инфраструктура
- Цепочки поставок
- Стандарты

Квантовые компьютеры

Для реализации потенциала квантового компьютера необходимо решить ряд ключевых проблем в области исследований и разработок. Области ближайшей перспективы, которые потребуют постоянного внимания, включают:

Гибридные вычислительные мощности - использование всех преимуществ квантовых вычислений потребует взаимосвязанные системы квантовых компьютеров и классических компьютеров, позволяющие использовать то, что каждый из типов систем делает лучше всего при сложных вычислениях, и упрощающие пользователям доступ к квантовым компьютерам и их использование, в том числе через облако.

Квантовые симуляторы - Прежде чем будут доступны "отказоустойчивые" квантовые компьютеры, будет важно обладать мощными возможностями для моделирования квантовых вычислений, чтобы лучше понимать типы проблем, которые лучше всего могут быть решены этими системами, и протестировать, как будут работать различные аппаратные подходы без необходимости инвестировать в ряд прототипов систем [1].

Работа в Канаде уже ведется. В ноябре 2020 года Innovative Solutions Canada (ISC) объявила конкурс на Квантовые вычисления как услуга решения для оптимизации решения сложных задач. В феврале 2022 года ISC также объявила конкурс на разработку уменьшенного холодильника для разбавления в поддержку технологий квантовых вычислений.

В июне 2022 года ISC объявила конкурс на тестирование докоммерческих прототипов квантовых вычислений, которые решают ряд задач федерального правительства приоритеты. NRC находится в процессе запуска сложной программы прикладных квантовых вычислений [1].

Безопасность

По данному направлению предусмотрено развитие Национальной сети квантовых коммуникаций в сочетании с постквантовой криптографией.

Такая сеть включала бы наземную и спутниковую инфраструктуру, значительно превосходящую нынешние канадские и международные возможности. В будущем, "квантовый интернет" также мог бы использоваться канадскими отраслями промышленности, такими как финансовый сектор и наращивание квантовой кибербезопасности.

"Сделано в Канаде" - цифровой суверенитет

По данному направлению требуется поддержка для разработки коммерчески жизнеспособного квантового распределения ключей, продолжения участия в деятельности по стандартизации и интеграции криптографических схем с существующей программной архитектурой, основанной на безопасности. В долгосрочной перспективе, в соответствии с отраслевыми стандартами будет важным фактором в приобретении решений [1].

Работа над этой миссии уже началась. Правительство Канады, возглавляемое Учреждением безопасности связи, предприняло мероприятия чтобы гарантировать, что его высокочувствительные хранилища данных защищены от квантовой угрозы. Эти действия координируются с международными союзниками для поддержания функциональной совместимости. Идентификация правительственных систем и данных Канады, которые являются Партнерами. Проект является одним из первых тестов спутниковой безопасной квантовой связи, и ожидается, что он будет запущен в ближайшие годы.

Программа повышения пропускной способности и защищенности сетей с 2019 года поддерживает совместные научно-исследовательские проекты в области квантовых коммуникаций с промышленностью, научными кругами и другими правительственными ведомствами.

В июне 2022 года ISC объявила конкурс на поддержку предпродажных прототипов квантовых коммуникаций, это может быть протестировано в реальных условиях и направлено на решение целого ряда приоритетных задач федерального правительства. Кроме того, в 2017 году правительство Канады инициировало проект квантового шифрования и научного спутника (QEYSSat) с несколькими правительственными организациями, академическими институтами и частными лицами [1].

Квантовое зондирование

Квантовые датчики значительно улучшат точность, чувствительность и эффективность многих различных видов измерений и, в некоторых случаях,

создадут совершенно новые возможности и области применения для изучения. Ожидается, что внедрение квантовых датчиков поможет решить многие насущные проблемы Канады, обеспечив значительные достижения в области обороны и безопасности, разведки и добычи важнейших полезных ископаемых, инфраструктуры и мониторинга окружающей среды, безопасности навигации и транспорта, а также здравоохранения.

На горизонте появляются первые коммерческие возможности, а в ближайшие несколько лет ожидается более масштабное воздействие. По прогнозам, **к 2026 году мировой рынок квантовых датчиков составит почти 550 миллионов долларов США**[1].

Руководство Канады уверено, что Стратегия определит будущее квантовых технологий в Канаде и поможет создать тысячи рабочих мест.

С полным текстом квантовой Стратегии Канады (машинный перевод на русский язык) можно ознакомиться на сайте Национальной Академии наук при Президенте РК [2].

Анализ реализации квантовой стратегии Канады через год после принятия представлен в публикации [3].

Использованные источники по разделу 2.6

- 1.Canada's National Quantum Strategy, <https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/sites/default/files/attachments/2022/NQS-SQN-eng.pdf>
2. https://ru.qazscience.gov.kz/wp-content/uploads/2024/12/Canada_QS_ru.pdf
3. Canada's national quantum strategy one year on, 24.09.2024,

2.7. Программные документы Китая по развитию квантовых технологий

В стратегических документах КНР тематика квантовых технологий как отдельное приоритетное направление впервые выделена в 2006 году, когда квантовые технологии впервые были упомянуты как отдельная тематика исследований и разработок (в контексте развития полупроводниковой электроники и систем квантовых коммуникаций и вычислений), отмечают аналитики ВШЭ РФ [1].

Собственно стратегия развития квантовой науки представлена в принятой в 2016 году в Китае Национальной программе ключевых исследований и разработок. Развитие квантовой науки в Китае стали усиленно поддерживать с 2014 года, после масштабной реорганизации системы планирования и финансирования НИОКР, нацеленной на развитие инноваций, создание совместных межинституциональных центров, увеличение инвестирования в НИОКР, оптимизацию системы управления грантами [1].

Долгосрочные планы Китая в отношении квантовых технологий заставляют США и ЕС играть в догонялки, считают эксперты европейского Института исследований Китая MERICS, которые опубликовали свои исследования в декабре 2024 года.

Основные выводы исследования:

- 1) Китай рассматривает квантовые технологии как ключевой фактор в глобальной конкуренции в области науки и технологий и увеличил государственные расходы на научное и промышленное развитие примерно до 15 миллиардов долларов США.
- 2) С 2022 года Китай ежегодно публикует больше научных работ по квантовой тематике, чем любая другая страна, включая США.
- 3) Развитие квантовых технологий в Китае в основном регулируется государством. Пекин прекрасно понимает, что тот, кто первым разработает квантовые технологии, получит ощутимые военные преимущества в криптологии, коммуникации и обработке информации.

4) Роль частного капитала и компаний в Китае намного меньше, чем, например, в США. Ключевые квантовые компании Китая являются посредниками между государственными исследовательскими лабораториями и государственными клиентами квантовых услуг, с ограниченным агентством.

5) Китай лидирует в области квантовой связи: страна может похвастаться крупнейшей в мире сетью квантовой связи протяженностью 12 000 километров, включающей два квантовых спутника.

6) Эффективность экспортных ограничений, введенных европейскими странами, США и другими странами в 2023 и 2024 годах, подрывается отсутствием согласия по техническим деталям и коммерческим интересам каждой страны [2].

При президенте Си Цзиньпине наука и технологии, в том числе квантовые технологии, приобрели важное значение в правительственных планах Китая высокого уровня, считают эксперты. Данное утверждение подтверждается данными рисунка 2.11.

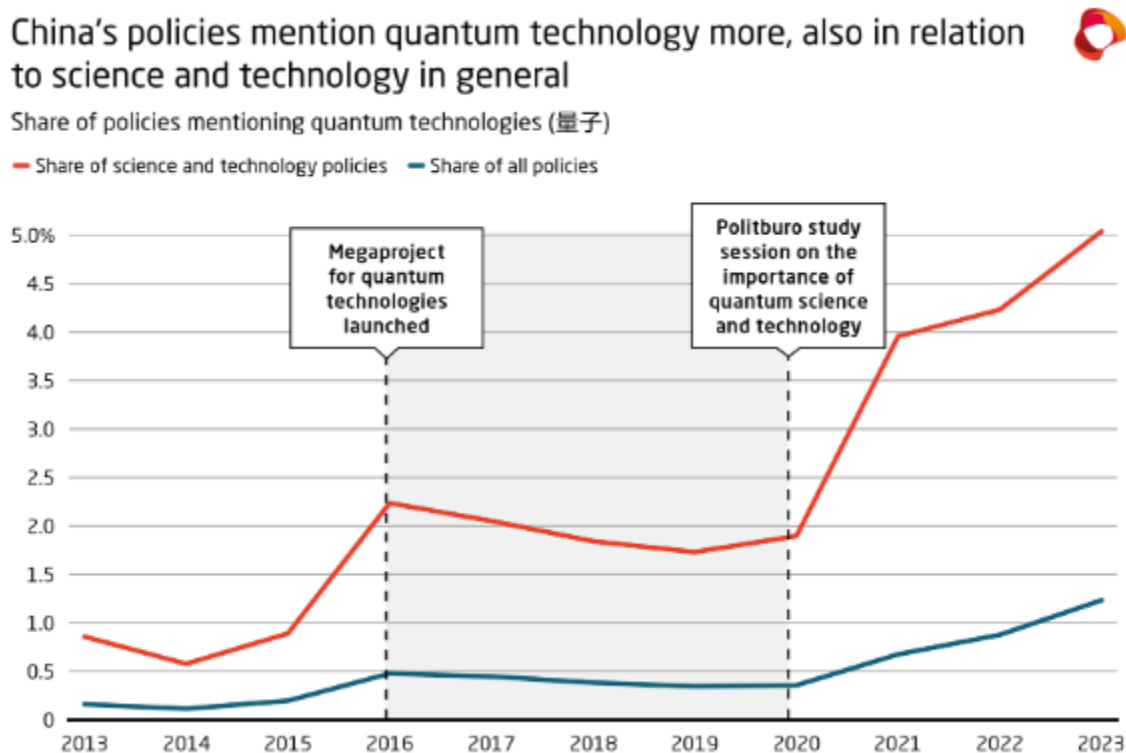


Рисунок 2.11—Упоминание квантовых технологий в политических документах Китая [2].

На сессии Политбюро по изучению технологий в 2020 году Си Цзиньпин назвал квантовые технологии еще одним фронтом в глобальной конкуренции в области науки и технологий [2].

В 2006 году новаторский план Китая по науке и технологиям на 2020 год включил «квантовый контроль» в число основных областей исследований, имея в виду усилия по манипулированию квантовыми состояниями, начиная с нескольких частиц. После всплеска упоминаний квантовых технологий в политических документах, область исследований была повышена в 2016 году с объявлением о мегапроекте S&T по «квантовой информации и квантовым вычислениям», что сделало его одним из 16 главных приоритетов S&T Китая на период 2021–2035 годов [2].

Мегапроекты S&T являются основным компонентом долгосрочных планов НИОКР Китая. Каждый мегапроект содержит несколько подзадач, при этом исследователи подают заявки на финансирование 3–5-летних проектов. «Квантовая информация» заняла второе место среди передовых областей S&T, которые китайское правительство отдало приоритет в своем пятилетнем плане на 2021–2025 годы, после искусственного интеллекта, но перед полупроводниками.

Для реализации этого в 2017 году была создана **Национальная лаборатория квантовой информатики (NLQIS)**. Это помещает квантовые технологии в небольшую группу приоритетных областей исследований.

Пекин также усиливает поддержку внедрения квантовых технологий в промышленность. Министерство промышленности и информационных технологий (МИПТ) опубликовало планы будущих технологий в январе 2024 года, включив квантовые компьютеры в десятку самых ожидаемых продуктов [2].

План также призывал к будущим коммуникационным технологиям, включающим квантовую информацию, расширяя цели, изложенные в документе «Сделано в Китае 2025», плане модернизации промышленности Китая, выпущенном в 2015 году.

Флагманские проекты Китая являются секретными и дорогостоящими: строительство национальной лаборатории началось с инвестиций в размере 7 миллиардов юаней (1 миллиард долларов США), но публичной информации о её годовом операционном бюджете нет, а их поддержку оказывает ряд исследовательских программ и институтов более низкого уровня, отмечают аналитики MERICS [2].

Государственные расходы Китая на квантовые технологии в четыре раза выше, чем в США, и на Китай приходится более половины предполагаемых мировых государственных инвестиций в квантовые технологии. Это справедливо как для науки, так и для внедрения.

Сильные стороны квантовых технологий Китая также представлены в ноябре 2024 года в публикации [3]. Она основана на обзоре отчета «Quantum Tech in China», подготовленном Global Quantum Intelligence (GQI) совместно с Европейским консорциумом квантовой промышленности (QuIC). Данный отчет является наиболее полным анализом квантовых технологий Китая, включая оценку деятельности правительства и национальных стратегий в сфере QT[4].

Использованные источники по разделу 2.7

1. Китайский путь к «квантовому превосходству»,
<https://issek.hse.ru/news/943628872.html>
2. China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up,
14.12.2024, <https://merics.org/en/report/chinas-long-view-quantum-tech-has-us-and-eu-playing-catch>
3. China's Quantum Technology Strengths – More than Quantum Communication,
11.09.2024, <https://quantumcomputingreport.com/chinas-quantum-technology-strengths-more-than-quantum-communication/>
4. Quantum Tech in China, <https://www.global-qi.com/product-page/quantum-tech-in-china>

2.8. Дорожные карты России по развитию квантовых технологий

Квантовые технологии являются одними из ключевых в обеспечении цифрового суверенитета России и уже входят в концепцию нового нацпроекта «Экономика данных». Развитием квантовых технологий активно занимаются ведущие ВУЗы, институты развития, крупнейшие промышленные компании, такие как Банк ГПБ (АО) и ГК «Росатом», а также стартапы КуБорд, QApp, QRate и QLU. Достижения в области квантовых технологий были представлены на Форуме будущих технологий-2023 первым лицам государства [1].

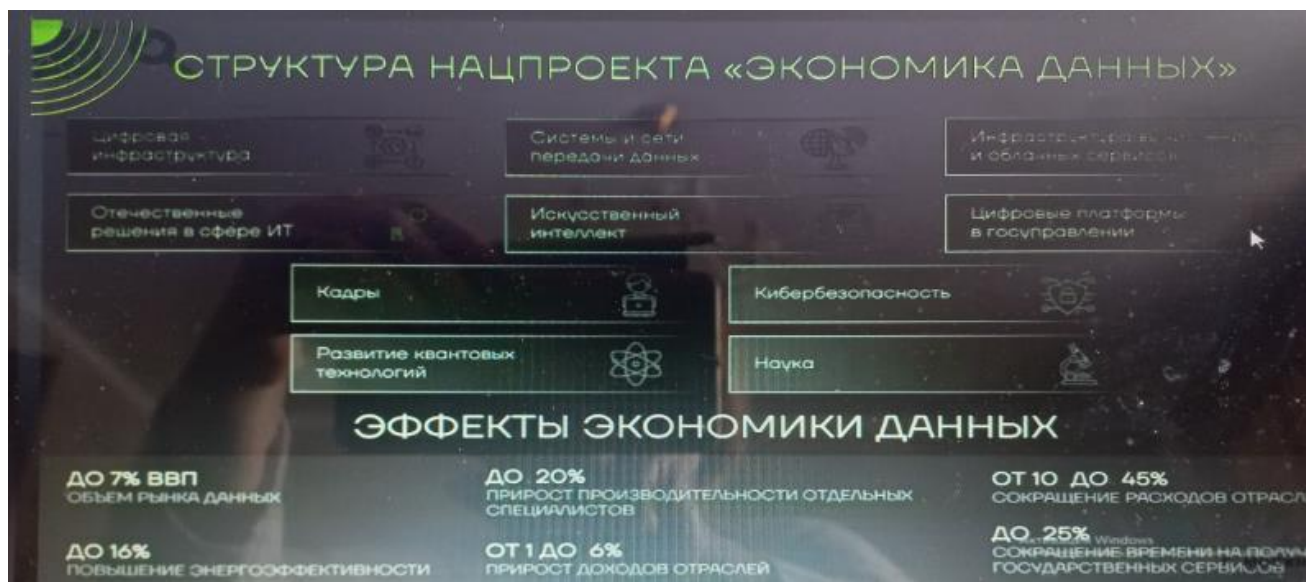


Рисунок 2.12- Из презентации на конференции Go Digital- 2024

Из паспорта Национального проекта РФ « Экономика данных»

Сроки реализации проекта 01.01.2025-31.12.2030

Куратор нацпроекта - Григоренко Д.Ю. - Зам председателя правительства РФ-
Руководитель Аппарата Правительства РФ

Руководитель нацпроекта – Шадаев М.И.- Министр цифрового развития, связи и
массовых коммуникаций РФ

Администратор нацпроекта – Заренин А.А.- зам. министра [1].

В 2019 году в России была разработана Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии» [2].

Перечень квантовых субтехнологий согласно протоколу НС РФ:

- Квантовые вычисления;
- Квантовые коммуникации;
- Квантовые сенсоры и метрология.

Квантовые вычисления для решения задач индустрии в Российской Федерации к 2024 году согласно Дорожной карте представлены на рисунке 2.13.



Источник: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019kvantyi.pdf>

Рисунок 2.13 - Квантовые вычисления для решения задач индустрии в РФ к 2024 году

Программа развития высокотехнологичной области "Квантовые вычисления" в России была утверждена в июле 2020 года. "Россия вошла в круг стран, которые системно развивают квантовые технологии. "Квантовые вычисления" - первая из утвержденных "дорожных карт" федерального проекта "Цифровые технологии". В рамках национальной программы "Цифровая экономика" на ее реализацию в 2020 году было выделено 3,7 миллиарда рублей,

внебюджетное финансирование со стороны "Росатома" составило 2 миллиарда", - отметил заместитель главы министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций и руководитель проекта "Цифровые технологии" М. Паршин [3].

Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Квантовые вычисления» является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Росатом» от 10 июля 2019 года, заключенного в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 июля 2019 г. № 1484-р в целях развития квантовых вычислений.

К работе над дорожной картой были привлечены более 120 экспертов из ведущих научных организаций РФ и представителей индустрии. Ключевыми предложениями данной дорожной карты являются:

1. Всесторонняя поддержка прорывных научно–технологических проектов, направленных на развитие КТ.
2. Консолидация научного и технологического сообщества в рамках создания проектов национального и глобального масштаба.
3. Создание в России инновационной экосистемы и формирование условий для перехода квантовых разработок из лабораторий в индустрию, а также формирование бизнес–сообщества.
4. Организация сотрудничества между научно–исследовательскими подразделениями и потенциальным потребителями квантовых технологий из ключевых сфер промышленности.
5. Развитие кадрового потенциала в области квантовых технологий путем внедрения новых типов образовательных программ всех уровней.
6. Проведение комплекса организационных мероприятий, направленных на снижение бюрократического трения.

Целевые показатели развития квантовых технологий в РФ согласно Дорожной карте до 2021 и 2024 года представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3- Целевые показатели развития квантовых технологий в РФ

Показатель	2019	2021	2024
Количество публикаций по квантовым технологиям, в год	560	800	1200
в том числе. количество публикаций в журналах с IF больше 3	190	290	480
Количество РИД, в год	30	50	60
Квантовые вычисления			
Количество кубитов в сверхпроводниковом квантовом компьютере	2	5–10	30–50
Количество кубитов в квантовом компьютере на нейтральных атомах	10	50	100
Количество кубитов в квантовом компьютере на ионах	1	5	55
Количество каналов в квантовом компьютере на фотонах	10	50	100
Количество <u>частиц</u> в квантовом компьютере/симуляторе на поляритонах	50	100	1000
Количество экспериментов на квантовой облачной платформе	0	20	10000
Квантовые коммуникации (с учетом пилотных внедрений)			
Общая протяженность сетей, км	100	1000	10000
Поддерживаемое количество портов в сетях точка–многоточка	24	64	128
Предельная дальность вне лаборатории, км	100	200	250
Скорость генерации секретного ключа, кбит/с на 25 км	10	100	5000
Сертификация оборудования	–	+	+
Квантовые сенсоры			
Разработано количество типов промышленных образцов квантовых сенсоров	2	4	6
Пример: среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение измеренного значения меры частоты за интервал 10 ч	10^{-16}	10^{-17}	10^{-18}
Пример: пространственное разрешение сенсоров на центрах окраски, мкм	10	2	0.5

В результате скоординированной работы по Дорожной карте по итогам 2020 года Россия поднялась на один пункт в международной шкале Quantum Technology Readiness Levels, отражающей уровень развития технологий квантовых вычислений. Правительство готово оказывать активную помощь российским исследователям - еще одним шагом может стать создание единой

цифровой платформы по квантовым технологиям для обмена команд опытом и наработками. [3].

До 2024 года финансирование "дорожной карты" было запланировано в объеме более 23 миллиардов рублей - бюджетных и внебюджетных. Значительная часть этих денег направлена на объединение усилий по разработке квантовых компьютеров.

В конце 2020 года в России стартовал федеральный проект "Национальная квантовая лаборатория", который объединил российских разработчиков в консорциум на базе нескольких лабораторных площадок, включая "Росатом", НИТУ "МИСиС", НИУ "ВШЭ", МФТИ, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Российский квантовый центр и фонд "Сколково" [3].

В 2022 году эксперты ВШЭ отмечали, что технологическое отставание России от мировых лидеров в области квантовых вычислений составляло 7–10 лет, при этом предполагалось, что к 2025 году данный разрыв будет сокращён до 2-3 лет благодаря комплексу мер и интенсификации исследований и разработок в области квантовых технологий [4].

В августе 2020 года в Российской Федерации также был утвержден "Паспорт "дорожной карты" развития высокотехнологичной области **"квантовые коммуникации"** на период до 2024 года" [5].

Высокотехнологичная компания, отвечающая за реализацию "дорожной карты" - Открытое акционерное общество "Российские железные дороги" (ОАО "РЖД").

Ответственные исполнители - федеральные органы исполнительной власти, органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации и иные организации, участвующие в реализации "дорожной карты", в том числе: Министерство образования и науки России, Минкомсвязь России, Минпромторг России, ПАО "Ростелеком", ГК "Росатом", технопарки "Кванториум", Фонд "Талант и Успех", Росстандарт [5].

Цели дорожной карты - ускорение технологического развития и достижение Российской Федерацией позиции одного из лидеров на глобальных

технологических рынках в высокотехнологичной области "Квантовые коммуникации".

Приоритетные высокотехнологичные продукты и сервисы, предусмотренные дорожной картой:

1. Сервис предоставления в аренду магистральных оптоволоконных каналов связи.
2. Магистральная система КРК.
3. Шифратор со скоростью более 100 Гбит/с с поддержкой квантового канала
4. Системы КРК точка - многоточка с недорогим клиентом для сетей топологии "звезда".
5. Мультиплексор квантовых и информационных каналов (xWDM): обеспечение совместной работы квантового канала с классическим.
6. Портативные устройства КРК для абонентских устройств и интернета вещей.
7. Системы КРК через наземные атмосферные оптические каналы связи.
8. Системы КРК между подвижными объектами.
9. Устройство формирования случайных последовательностей для систем КРК.
10. Устройство счета одиночных фотонов для квантовой коммуникации.
11. Сервер квантово-защищенных ключей.
12. Система управления квантовой сетью со стационарными и мобильными абонентами.
13. Пилотные поставки продуктов и предоставление сервисов.
14. Спутниковые системы КРК.
15. Образовательные программы по квантовым коммуникациям.

Объемы и источники финансирования:

- Ассигнования федерального бюджета – 10, 24 млрд. рублей;
- Внебюджетные средства в размере 6,52 млрд. рублей, в том числе собственные средства высокотехнологичной компании РЖД в размере 5,32 млрд. рублей [5].

В 2023 году Росстандартом были утверждены 4 первых российских стандарта, два относятся к квантовой связи, а два к квантовому интернету [6].

Стандарт определяет: - основные положения и принципы в области квантовых коммуникаций; - типовые схемы построения квантовых сетей; - общие принципы использования квантовых сетей для решения задач квантового распределения ключей; - общие принципы сопряжения сетей квантового распределения ключей с квантовозащищенными сетями связи [7].

Пример инфраструктуры квантовых сетей в Российской Федерации к 2024 году представлен на рисунке 2.14.

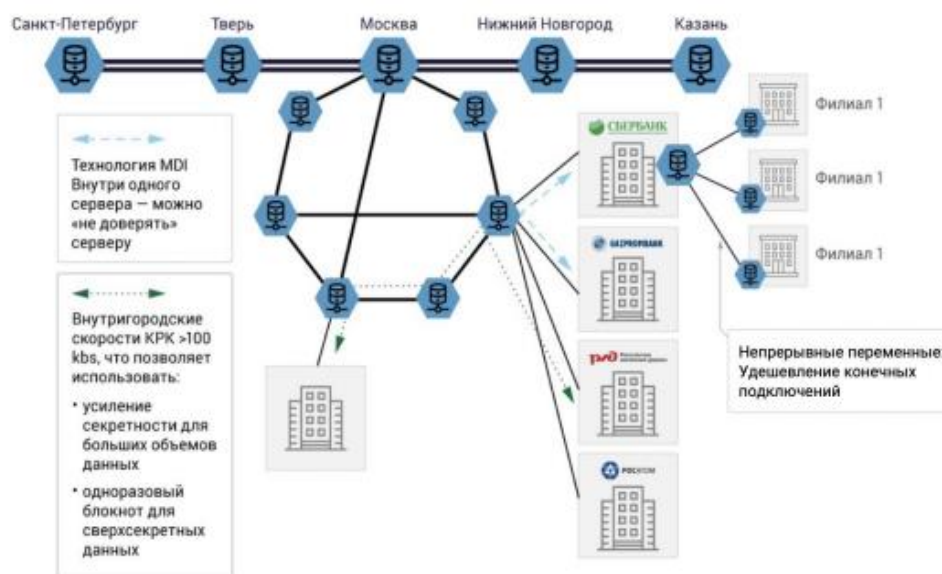


Рисунок 2.14- Пример инфраструктуры квантовых сетей в РФ к 2024 году

Роль квантовых технологий в России уже осознана на высшем уровне. Они относятся к приоритетным направлениям научно–технологического развития и были упомянуты Президентом РФ В.В. Путиным в Ежегодном Послании Федеральному Собранию ещё в 2016 году, см. вставку 2.2.

Вставка 2.2.

Ежегодное послание Президента Российской Федерации В.В. Путина Федеральному собранию:
«Нам нужны собственные передовые разработки и научные решения. Цифровые технологии, другие так называемые сквозные технологии, которые сегодня определяют облик всех сфер жизни. Страны, которые смогут их генерировать, будут иметь долгосрочное преимущество. Другие окажутся в зависимом, уязвимом положении. Это цифровые, квантовые технологии, робототехника, нейротехнология и т.д. В цифровых технологиях кроются и риски. Необходимо укреплять киберзащиту. Развитие цифровой экономики, в ее реализации будем опираться именно на российские компании»

Ещё в феврале 2018 года в России было объявлено о создании первого квантового консорциума. В консорциум вошли Московский Государственный университет, Фонд перспективных исследований, Внешэкономбанк и ряд других российских организаций. В начале июня были сформулированы цели и задачи

консорциума: разработать в течение трёх лет два прототипа 50-кубитных квантовых вычислителей с использованием двух различных платформ (на основе нейтральных атомов и интегральной оптики).

В России серьёзно работают в области развития квантовых технологий частные компании, ведущая из них - Российский квантовый центр (RQC), см. рисунок 2.15.



Источник: Презентация компании 07.11.2024 года в Астане

Рисунок 2.15- Направления исследований Российского квантового центра

Использованные источники по разделу 2.8

2. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии», М., 2019, <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019kvantyi.pdf>
3. В 2020 году в России запущена программа развития квантовых технологий, 19.05.2021, <https://rg.ru/2021/05/19/v-2020-godu-v-rossii-zapushchena-programma-razvitiia-kvantovyh-tehnologij.html>
4. Развитие отдельных высокотехнологичных направлений в России и мире, 2022, https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_opublikovalo_beluyu_knigu_vysokih_tehnologiy_v_rossii_i_za_rubezhom.html
5. <https://proquant.ru/quants/govpolicy/waycard/dorozhnaya-karta-razvitiya-vysokotekhnologichnoy-oblasti-kvantovye-kommunikatsii>
6. www.serconsrus.ru/press-centr/novosti-otrasli/standarty-dlya-razvitiya-kvantovykh-tehnologiy-svyazi-v-rf/
7. <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=7376843>

2.9. Национальная квантовая инициатива США

В конце 2018 года, 22 декабря, Президент США Дональд Трамп подписал законопроект «О национальной квантовой инициативе» [1]. Закон учреждает Национальное Квантовое Координационное Бюро, которое будет частью Белого дома. Он также призывает к разработке многолетнего стратегического плана, чтобы помочь Америке оставаться на переднем крае квантовой революции.

На стимулирование квантовых технологий в США на первые пять лет был предусмотрен бюджет в размере 1,2 млрд. долларов США [2]. Как отмечают сами американские эксперты, исследования в данном направлении форсируются, так как есть серьёзные опасения, что Китай может занять лидирующие позиции в области квантовых технологий в мире [3]. Они ссылаются также на то, что Европейский союз уже запустил квантовый генеральный план стоимостью 1 млрд. Евро (1,1 млрд. долларов США)

Офис Правительства США в 2020 году опубликовал свое видение развития квантовых сетей в стране. Подкомитет NSTC по квантовой информатике (SCQIS) координирует федеральные исследования и разработки (НИОКР) в области квантовой информатики и связанных с ней технологий под эгидой Комитета NSTC по науке. Целью этих скоординированных исследований и разработок является обеспечение лидерства США в области квантовых технологий. Квантовая информатика и ее приложения будут поддерживаться и расширяться в течение следующего десятилетия. SCQIS - это под сопредседательством Министерства энергетики, Национального института стандартов и технологий, Национальный научный фонд и Управление политики в области науки и технологий Белого дома. Дополнительно в число членов входят Министерство обороны, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, Национальное Агентство безопасности, Управление директора национальной разведки, ведомство США по патентам и товарным знакам и Государственный департамент [4].

В мае 2022 года в США был принят «Меморандум национальной безопасности о содействии лидерству США в области квантовых вычислений при одновременном снижении рисков для уязвимых криптографических систем»

В меморандуме изложены политика и инициативы администрации, связанные с квантовыми вычислениями. В нем определены ключевые шаги, необходимые для сохранения конкурентного преимущества США в области квантовой информатики (QIS) и одновременного снижения рисков квантовых компьютеров для кибербезопасности, экономики и национальной безопасности страны. В нем указаны конкретные действия, которые агентства должны предпринять, поскольку Соединенные Штаты начинают многолетний процесс миграции уязвимых компьютерных систем на квантово-устойчивую криптографию. В секретном приложении к этому меморандуму рассматриваются чувствительные вопросы национальной безопасности [5].

В Меморандуме отмечается:

1. Квантовые компьютеры обладают потенциалом для внедрения инноваций в американской экономике, от таких разнообразных областей, как материаловедение и фармацевтика до финансов и энергетики. Хотя полный спектр приложений квантовых компьютеров пока неизвестен, тем не менее, ясно, что дальнейшее технологическое и научное лидерство Америки будет зависеть, по крайней мере отчасти, от способности страны поддерживать конкурентное преимущество в квантовых вычислениях и QIS [5].
2. Однако наряду с потенциальными преимуществами квантовые вычисления также представляют значительные риски для экономической и национальной безопасности Соединенных Штатов. В частности, квантовый компьютер достаточного размера и сложности - также известный как криптоаналитически релевантный квантовый компьютер (CRQC) - будет способен взломать большую часть криптографии с открытым ключом, используемой в цифровых системах в Соединенных Штатах и по всему миру. Когда он станет доступен, CRQC может поставить под угрозу гражданские и военные коммуникации, подорвать системы надзора и контроля для критической инфраструктуры и обойти протоколы безопасности для большинства финансовых транзакций в Интернете [5].

Для того чтобы сбалансировать конкурирующие возможности и риски квантовых компьютеров, политика администрации США заключается в следующем:

- 1) сохранить лидерство Соединенных Штатов в области квантовых вычислений посредством постоянных инвестиций, партнерств и сбалансированного подхода к продвижению и защите технологий;
- 2) смягчить угрозу CRQC посредством своевременного и справедливого перехода криптографических систем страны на совместимую квантово-устойчивую криптографию [5].

Большое внимание в Меморандуме уделяется науке и поддержке ученых, см. вставку 2.4.

Вставка 2.4

Продвижение лидерства Соединенных Штатов.

- а) Соединенные Штаты должны проводить общеправительственную и общеобщественную стратегию, чтобы использовать экономические и научные преимущества QIS и улучшения безопасности, предоставляемые квантово-устойчивой криптографией. Эта стратегия потребует скоординированного, проактивного подхода **к исследованиям и разработкам (НИОКР) QIS**, расширения образовательных и кадровых программ, а также сосредоточения на развитии и укреплении партнерских отношений с промышленностью, академическими учреждениями, союзниками и единомышленниками.
- б) Соединенные Штаты должны стремиться **поощрять преобразующие и фундаментальные научные открытия** посредством инвестиций в основные исследовательские программы QIS. Инвестиции должны быть направлены на открытие новых квантовых приложений, новых подходов к производству квантовых компонентов и достижений в квантовых технологиях, таких как фотоника, нанопроизводство, криогенные и полупроводниковые системы [5].

Меморандум также затрагивает вопросы международного сотрудничества, в нем указывается, что Соединенные Штаты должны содействовать

профессиональному и академическому сотрудничеству с зарубежными союзниками и партнерами. «Это международное взаимодействие имеет важное значение как для выявления и отслеживания глобальных тенденций QIS, так и для гармонизации программ квантовой безопасности и защиты»- отмечается в документе [5].

Раздел 3 Меморандума посвящён снижению рисков для шифрования:

Отмечается, что «Любая цифровая система, которая использует существующие публичные стандарты для криптографии с открытым ключом или которая планирует перейти на такую криптографию, может быть уязвима для атаки CRQC. Чтобы снизить этот риск, Соединенные Штаты должны отдать приоритет своевременному и справедливому переходу криптографических систем на квантово-устойчивую криптографию с целью снижения как можно большей части **квантового риска к 2035 году**» [5].

Директор Национального института стандартов и технологий (NIST) и директор Агентства национальной безопасности (NSA) в качестве национального менеджера по системам национальной безопасности (национальный менеджер) разрабатывают технические стандарты для квантово-устойчивой криптографии для своих соответствующих юрисдикций. Меморандумом предусмотрено, что первые наборы этих стандартов будут опубликованы к 2024 году и эти планы были успешно реализованы.

Государственные инвестиции в квантовые технологии

Правительство США значительно инвестировало в квантовые технологии с 2020 года, выделив 672 миллиона долларов в 2020 году, 855 миллионов долларов в 2021 году, 1,031 миллиарда долларов в 2022 году, а также 932 миллиона долларов в 2023 году на квантовые исследования и разработки. В 2024 году Конгресс выделил 968 миллионов долларов Национальной квантовой инициативе, финансирование охватывает деятельность по квантовым исследованиям в различных правительственных агентствах, включая Министерство обороны, НАСА, АНБ и Министерство энергетики. Финансирование также поддерживает создание и поддержание **14 центров**

квантовой информационной науки при Министерстве энергетики, Министерстве обороны и Национальном научном фонде.

Законопроект, изначально санкционирующий создание NQI, который составляет большую часть бюджета квантовых исследований США, истекает в следующем году. В конце 2023 года Комитет по космосу, науке и технологиям Палаты представителей единогласно проголосовал за повторное одобрение законопроекта, и 25 июля 2024 года законопроект был представлен всем членам Палаты. Одной из важных поправок к предлагаемому законопроекту является формулировка, обязывающая правительственные учреждения, занимающиеся квантовыми исследованиями, рассмотреть возможность использования ИИ в квантовой науке, инженерии и технологиях, а также возможность использования квантовых технологий для продвижения ИИ и других новых технологий. Если предположить, что законодательный процесс будет идти быстрыми темпами, законопроект о повторном одобрении позволит США оставаться на переднем крае инвестиций в квантовые исследования.

2 июля 2024 года Управление экономического развития Министерства торговли объявило о выделении \$41 млн на финансирование Elevate Quantum («Elevate»), частно-государственного консорциума, стремящегося продвигать квантовые исследования в Горном Западе. Грант автоматически разблокировал дополнительно \$77 млн. финансирования для Elevate от штата Колорадо и \$10 млн от Нью-Мексико, в результате чего общая сумма инвестиций достигла \$128 млн. По оценкам Университета Колорадо в Боулдере, грант Elevate привлечет более \$2 млрд частных инвестиций в Горный Запад, а также создаст более 10 000 рабочих мест в квантовом секторе.

Кроме того, 1 июля 2024 года Национальный научный фонд США («NSF») объявил о выделении гранта в размере 20 миллионов долларов США на строительство завода по производству нанотехнологий для ускорения разработки квантовых устройств.

В США исследованиями квантовых технологий занимаются Гарвардский университет, Чикагский университет и Массачусетский технологический институт, а также такие крупные IT-компании как Google, IBM, Microsoft, Intel.

Серьезные исследования проводятся в ведомственных научных учреждениях. Так, 25 сентября 2018 года, департамент энергетики Министерства энергетики США объявил о выделении 218 млн. долларов США на финансирование НИОКР по 85 проектам в области квантовой информатики, которые должны заложить «основы независимости страны для следующих поколений вычислений и обработки информации» [6].

Как отмечается в сообщении Министерства, данные инвестиции в условиях ожесточенной международной конкуренции «обеспечат лидерство США в области, которая может сформировать долгосрочное будущее обработки информации и даст много новых технологий, которые принесут пользу экономике и обществу» [6].

В структуре Министерства энергетики США функционирует Аргонская лаборатория, где уже в 2018 году работали 20 исследователей в сфере квантовой информатики. Аргоннская лаборатория и Чикагский университет вложили на тот период около 6 млн. долл. США для создания комплексных объектов для синтеза материалов, так называемый «Квантовый завод» [7].

На базе Чикагского университета (UChicago) при Институте молекулярной инженерии (IME) создан центр, получивший название Chicago Quantum Exchange (Чикагская квантовая биржа). Центр будет способствовать исследованию квантовой информации и разработке новых приложений с возможностью значительно улучшить технологию связи, вычислений и зондирования. Здесь с недавних пор готовят специалистов с квалификацией «Квантовые инженеры», чтобы удовлетворить потребности промышленности, государственных лабораторий и университетов. Программа состояла из восьми преподавателей и более 100 докторантов.

Таким образом, в Чикаго создается новая квантовая экосистема, которая обеспечивает совместную среду для исследователей, чтобы изобретать технологии, в которых все компоненты обработки информации - восприятие, вычисление, хранение и связь - хранятся в квантовом мире.

Использованные источники по разделу 2.9

1. Passage of the National Quantum Initiative Act, 22.12.2018
<https://quantum.uchicago.edu/2019/01/02/passage-of-the-national-quantum-initiativeact/>
2. President Trump has signed a \$1.2 billion law to boost US quantum tech
<https://www.technologyreview.com/the-download/612679/president-trump-has-signed-a12-billion-law-to-boost-us-quantum-tech/>
3. The man turning China into a quantum superpower, 19.12.2018,
<https://www.technologyreview.com/s/612596/the-man-turning-china-into-a-quantumsuperpower/>
4. Strategic Vision for America's quantum Networks, <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/01/A-Strategic-Vision-for-Americas-Quantum-Networks-Feb-2020.pdf>
5. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/04/national-security-memorandum-on-promoting-united-states-leadership-in-quantum-computing-while-mitigating-risks-to-vulnerable-cryptographic-systems>
6. Department of Energy Announces \$218 Million for Quantum Information Science, 25.09.2018, <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-218-million-quantuminformation-science>
7. Chicago Quantum Exchange, <https://quantum.uchicago.edu>

2.10 Национальная квантовая стратегия Франции

Национальная стратегия Франции по развитию квантовых технологий была принята в 2021 году, см. рисунок 2.16.



Рисунок 2.16 - Обложка официального документа по квантовой стратегии Франции -2021 [1].

Ключевым столпом этой стратегии является развитие международных партнерств. В ноябре 2022 года Франция, Нидерланды и Германия подписали трехстороннее соглашение о поощрении сотрудничества в академических исследованиях в области квантовых технологий и развитии международной экосистемы стартапов вокруг разработки квантовых компьютеров. Также в ноябре 2022 года Франция и США подписали совместное заявление о квантовой информационной науке и технологиях для содействия связям и сотрудничеству, необходимым для вывода квантовых технологий из лаборатории на рынок.

В марте 2024 года был обновлен французский национальный квантовый отчет, в котором отмечалось, что французская квантовая стратегия подкреплена

€1,8 млрд, которые будут инвестированы в течение четырехлетнего периода с 2021 по конец 2024 года . Национальное государственное финансирование составляет €1 млрд из этой общей суммы, включая €650 млн из плана «Франция 2030». Остальные €800 миллионов поступают от частных инвесторов [2].

Первые конкретные результаты национальной квантовой стратегии Франции представлены ниже:

- **Гибридная платформа квантовых вычислений**

Инициатива HQI с бюджетом в 72,3 миллиона евро от «Франция 2030» направлена на разработку гибридной вычислительной платформы, соединяющей классические вычислительные системы и квантовые устройства, которые затем рассматриваются как ускорители. Он будет доступен международному сообществу, объединяющему лаборатории, стартапы и производителей. Цель платформы - облегчить ученым доступ к возможностям квантовых вычислений, чтобы иметь возможность выявлять, разрабатывать и тестировать новые варианты использования.

- **Программа квантовых исследований (PEPR)**

Поддерживая исследовательскую деятельность на лучшем глобальном уровне, программа исследований (PEPR) в области квантовых технологий призвана усилить национальные усилия в этой области и стимулировать действия, более отдаленные от национальной квантовой стратегии, такие как национальная платформа гибридных квантовых вычислений HQI, а также появление промышленной деятельности.

- **Поддержка компаний на разных этапах их инноваций**

Франция, колыбель нескольких крупных прорывов, лежащих в основе нынешнего прогресса крупных мировых технологических компаний, стремится стать одной из первых стран, разработавших крупномасштабный универсальный квантовый компьютер, обеспечивающий технологический суверенитет и способствующий стратегической автономии Европы. Поскольку уже выделено 80 миллионов евро от «Франция 2030», важнейшие промышленные отрасли

сектора получают мощную поддержку. Во Франции появилось несколько конкретных и заметных проектов:

- **PASQAL**, который собрал 100 миллионов евро, разрабатывает квантовый компьютер с нейтральными атомами;
- **Siquance**, новорожденный CEA и CNRS, разрабатывает и продает квантовый компьютер на основе полупроводниковых технологий и с возможностями европейских производителей чипов;
- **Алиса и Боб**, победительница инновационных конкурсов i-PhD и i-Lab во Франции 2030, работает над созданием универсального квантового компьютера с коррекцией ошибок;
- **Aqemia**, созданная осенью 2021 года в партнерстве с École Normale Supérieure (ENS) и CNRS, и специализирующаяся на исследованиях лекарств с использованием генеративного искусственного интеллекта для изобретения уникальных ключей и алгоритмов, вдохновленных квантовой механикой

В Париже 6 марта 2024 года на конференции Q2B- квантовые технологии для бизнеса, на которой была запущена новая программа PROQCIMA. Программа предусматривает разработку во Франции двух прототипов универсальных квантовых компьютеров 2030 году. Пять французских компаний получили до 500 миллионов евро на разработку этих прототипов от Агентства оборонных закупок.

Развитие инфраструктуры, в частности, для содействия использованию гибридных квантово-классических суперкомпьютеров, продолжает предоставлять большему количеству французских исследователей доступ к этим высокопроизводительным системам.

В стране работают компании, имеющие результаты в сфере постквантовой криптографии, они объединили усилия для разработки безопасных сетей связи будущего. Так, консорциум RESQUE объединил шесть французских компаний и организаций, играющих взаимодополняющие роли в сфере кибербезопасности, технологический лидер и координатор консорциума – оборонная компания Thales [3].

В мае 2024 года Банк Франции успешно провел эксперимент с постквантовыми технологиями безопасности Cryptonext Security, совместно с Денежно-кредитным управлением Сингапура [4].

Удовлетворение потребностей в навыках и профессиях критически важных секторов Проект QuanTEdu-France, возглавляемый Университетом Гренобль-Альпы и поддерживаемый консорциумом из 21 академического учреждения, объединяет заинтересованные стороны начального и непрерывного обучения, при участии крупных игроков промышленности и инноваций в области квантовых технологий [5].

Использованные источники по разделу 2.10

1. Stratégie nationale sur les technologies quantiques, 2021,
https://www.enseignementsuprecherche.gouv.fr/sites/default/files/content_migration/document/Dossier_de_Presse_Presentation_de_la_strategie_nationale_sur_les_technologies_quantiques_1372307.pdf
2. French National Quantum Update -March 2024, 29.03.2024
<https://thequantuminsider.com/2024/03/29/french-national-quantum-update-march-2024/#:~:text=The%20French%20Quantum%20Strategy%20is,million%20comes%20from%20private%20investors>
- 3) Post-quantum Cryptography: 6 French Cyber Players Join Forces to Design the Secure Communication Networks of Tomorrow, 18.03.2024,
<https://www.asdnews.com/news/defense/2024/03/18/postquantum-cryptography-6-french-cyber-players-join-forces-design-secure-communication-networks-tomorrow>
- 4) Banque de France and Monetary Authority of Singapore conduct groundbreaking Post-quantum Cryptography experiment to enhance communication security, 05.11.2024, <https://www.banque-france.fr/en/press-release/banque-de-france-and-monetary-authority-singapore-conduct-groundbreaking-post-quantum-cryptography>
- 5) <https://www.entreprises.gouv.fr/priorites-et-actions/autonomie-strategique/soutenir-linnovation-dans-les-secteurs-strategiques-14>

3. Технологии и достижения в разработке квантовых компьютеров

3.1. Общая информация о квантовых компьютерах и их производителях

В отличие от современных компьютеров, которые обрабатывают информацию в двоичной форме (битах), квантовые компьютеры используют кубиты (квантовые биты). Математические принципы, применяемые к кубитам, позволяют квантовым компьютерам достигать массового параллелизма в обработке информации. Хотя эта технология все еще находится в стадии разработки, она может произвести революцию во многих секторах экономики, а также представляет угрозу безопасности современных криптографических систем.

В структуре квантовых технологий квантовые компьютеры входят в общее направление «Квантовые вычисления». Эксперты отмечают, что квантовые вычисления ещё не стали практической реальностью, ни одна компания пока не разработала устройство, которое может превзойти классические суперкомпьютеры в чем – то большем, чем малоизвестные исследовательские задачи [1]. Но именно из-за потенциальных угроз для современных криптографических систем развернулась гонка в сфере квантовых технологий между основными геополитическими соперниками – США и Китаем, также в эту гонку включились Индия, Россия и другие страны.

Квантовые компьютеры, как отмечалось в разделе 1, разрабатывают на основе следующих **физических платформ**: атомная, ионная, фотонная, сверхпроводниковая, также возможно использование других перспективных технологий. Кубиты могут быть связаны друг с другом, образуя квантовые цепи, и управляться с помощью микроволновых импульсов. В настоящее время существует несколько различных подходов к разработке и производству квантовых компьютеров. Все перечисленные примеры компаний не являются исчерпывающими.

На данный момент выделяют пять ведущих типов кубитов, см. вставку 3.1.

Вставка 3.1

Пять ведущих типов квантовых компьютеров на 2024 год (машинный перевод)

1. Сверхпроводящий

Одним из самых популярных типов квантовых компьютеров является сверхпроводящий. Обычно изготавливаемые из сверхпроводящих материалов, эти квантовые компьютеры используют крошечные электрические цепи для производства и управления кубитами. При использовании сверхпроводящих кубитов операции с **вентильми** могут выполняться быстро.

2. Фотонный

Эти типы квантовых компьютеров используют **фотоны (частицы света)** для переноса и обработки квантовой информации. Для крупномасштабных квантовых компьютеров фотонные кубиты являются многообещающей альтернативой захваченным ионам и нейтральным атомам, которые требуют криогенного или лазерного охлаждения. Фотоника - это общая широкая категория. Например, подход «сжатого света» Xanadu существенно отличается от подхода PsiQuantum.

3. На нейтральных атомах

Квантовые вычисления на основе нейтральных атомов включают атомы, подвешенные в сверхвысоком вакууме массивами плотно сфокусированных лазерных лучей, называемых **оптическими пинцетами**.

Хотя не все компании, работающие с нейтральными атомами, используют оптические пинцеты. Квантовые компьютеры на нейтральных атомах менее чувствительны к блуждающим электрическим полям, что делает их хорошим вариантом для квантовых процессоров.

4. На захваченных ионах

Квантовый компьютер с захваченными ионами использует атомы или молекулы с чистым электрическим зарядом, известные как **«ионы»**, которые захватываются и управляются с помощью электрических и магнитных полей для хранения и обработки квантовой информации. Так как захваченные ионы могут быть

изолированы от окружающей среды, они полезны для точных измерений и других приложений, требующих высокого уровня стабильности и контроля. Кроме того, кубиты могут оставаться в состоянии суперпозиции в течение длительного времени, прежде чем станут декогерентными.

5. На квантовых точках

Квантовый компьютер на квантовых точках использует **кремниевые кубиты**, состоящие из пар квантовых точек. Теоретически для квантовых компьютеров такие «связанные» квантовые точки могут использоваться, как надежные квантовые биты или кубиты.

Другие подходы

Другие альтернативы созданию работоспособного типа квантового компьютера включают электроны на гелии, NV-алмаз и топологический подход.

Источник: <https://thequantuminsider.com/2023/06/06/types-of-quantum-computers/>

Таким образом, квантовый компьютер основан на кубитах, которые могут быть реализованы различными способами.

Ведущие компании, разрабатывающие квантовые компьютеры по типам используемых физических платформ представлены в таблице 1.3

Таблица 3.1- Компании, разрабатывающие квантовые компьютеры по типам

Типы квантовых компьютеров	Компании – разработчики
Сверхпроводящие	Google, IBM, IQM и Rigetti Computing
Фотонные	Xanadu, ORCA Computing, Quantum Computing Inc и PsiQuantum и др.
На нейтральных атомах	Pasqal (объединенная с Qu&Co), Atom Computing, ColdQuanta и QuEra и др.
На захваченных ионах	Quantinuum, IonQ, Quantum Factory, Alpine Quantum Technologies, eleQtron и др.
На квантовых точках	Diraq, Siquance и Quantum Motion и др.

Составлено по данным <https://thequantuminsider.com/2023/06/06/types-of-quantum-computers/>

Из всего многообразия подходов, наиболее проработанным сегодня является метод получения кубитов, основанный на сверхпроводниках. Об этом свидетельствует и статистика распределения патентных заявок, направленных на квантовые компьютерные модальности, см. раздел 1.1.

Квантовые компьютеры также подразделяют на:

- **Универсальные** - способны выполнять разнообразные квантовые операции, включая квантовые алгоритмы поиска, факторизации, оптимизации и моделирования, а также для обработки обширных объемов данных.
- **Узкоспециализированные** - создаются для решения конкретных классов задач, например, квантовые симуляторы, устройства квантового отжига. Такие квантовые системы могут иметь ограниченный набор логических операций. [8].

Для реализации логических схем на обычном компьютере используются логические операции, для операций над кубитами используют иную систему операций, называемую **квантовыми вентилями**. Вентили бывают однокубитные и двухкубитные, в зависимости от того, над сколькими кубитами производится преобразование.

Квантовые компьютеры работают, создавая суперпозицию множества различных возможных решений проблемы, закодированных в кубитах. Затем они манипулируют этой суперпозицией так, чтобы неправильные решения отменялись, а правильные усиливались. Используя эти возможности, квантовые компьютеры могли бы:

- оптимизировать логистику, чтобы доставлять посылки быстрее и точнее;
- повысить эффективность сетей общественного транспорта;
- моделировать вероятности экстремальных погодных явлений и сложных проблем со здоровьем, таких как пандемии;
- моделировать оптимальные реакции на чрезвычайные ситуации, такие как пожары и наводнения;

- моделировать сложные молекулы, которые могут быть использованы в передовых материалах (например, лучшая структура и состав материала для самолетов) и чистых технологиях, таких как батареи;
- моделировать химические и лекарственные реакции, которые могут значительно ускорить медицинские исследования новых лекарств и вакцин
- улучшить наблюдение за Землей из космоса для более точного определения параметров устойчивости к стихийным бедствиям и изменению климата [6].

Создание квантовых систем сопряжено с рядом технических трудностей, см. вставку 3.2.

Вставка 3.2

Технические проблемы при создании квантовых компьютеров

1. Чувствительность кубитов. Внешние воздействия могут разрушить квантовые состояния (декогеренция). Чем дольше кубит способен сохранять когерентность, тем больше вычислительных операций можно успеть выполнить. Добиться долгой когерентности сложно, поскольку нужно предельно изолировать систему от внешних шумов и при этом иметь доступ к ней для проведения логических операций.

2. Температурные условия. Для работы большинства квантовых процессоров требуются температуры, близкие к абсолютному нулю. При этом нужно иметь возможность точного и быстрого управления состояниями кубитов (посредством электромагнитных импульсов, лазерного облучения или микроволновых сигналов) с очень высокой точностью.

3. Материалы и технологические ограничения. Разработка подходящих материалов, сверхпроводниковых схем, ионных ловушек, полупроводниковых квантовых точек или фотонных схем, способных обеспечить стабильность кубитов – это сложная междисциплинарная задача. Необходимы новые подходы в литографии, разработке микроволновой/оптической аппаратуры, криогенных систем, систем контроля и электроники.

4. Коррекция ошибок. Без эффективной квантовой коррекции ошибок долгое вычисление невозможно. Однако реализация алгоритмов квантовой коррекции ошибок требует множества дополнительных логических кубитов (так называемых «кубитов коррекции»), что многократно усложняет и без того непростую конструкцию квантового процессора.

Источник: <https://www.tadviser.ru/index.php/Статья: Квантовые компьютеры>

По мнению экспертов, квантовые процессоры к концу 2024 года ещё не способны безошибочно выполнять алгоритмы - всегда ошибаются, что неприемлемо для вычислений. Ключевой сложностью, с которой сталкивались разработчики квантовых систем - поддержание когерентности кубитов - их способности оставаться в суперпозиции квантовых состояний в течение достаточного времени для выполнения сложных вычислений [3]. Поэтому основные усилия разработчиков направлены на снижение ошибок.

По данным американского Forbes на начало 2024 года в топ -10 лучших компаний в сфере квантовых вычислений входили следующие:

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| ▪ IBM Corporation | ▪ D-Wave |
| ▪ Google Quantum AI | ▪ Quantinuum |
| ▪ Amazon Web Services | ▪ Rigetti |
| ▪ Microsoft Azure | ▪ Xanadu |
| ▪ Intel | ▪ Atos Quantum [1]. |

Также добиваются значительных успехов в области квантовых вычислений в США такие компании как IonQ , Infleqtion , QC Ware и Zapata Computing [1].

В квантовых вычислениях США, по мнению экспертов, опережают Китай. Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ (Россия) анализируя планы и направления реализации государственной политики Китая по развитию квантовых технологий, в июле 2024 года отмечал, что в области квантовых вычислений и процессоров КНР в целом все еще отстает от США по ряду оценок, на 3-4 года [4].

При этом на данный момент Китай достиг значительных успехов в сверхпроводниковых и фотонных квантовых вычислениях, став единственный страной, достигшей «квантового превосходства» с помощью двух различных технологических платформ, на которых базируются разработки по созданию квантовых компьютеров [4].

Рассмотрим более подробно разработки передовых американских и китайских компаниях, основываясь на официальной информации самих производителей.

Используемые источники по разделу 3.1

1. Top 10 Quantum Computing Companies Making Change, 11.12.2023,
<https://www.forbes.com/sites/technology/article/top-quantum-computing-companies/>
2. Patent Landscape for Quantum Computing: A Survey of Patenting Activities for Different Physical Realization Methods, 13.02.2024,
<https://ipwatchdog.com/2024/02/13/patent-landscape-quantum-computing-survey-patenting-activities-different-physical-realization-methods/id=173303/>
3. Квантовые компьютеры и квантовая связь, <https://www.tadviser.ru/index.php>
4. Китайский путь к «квантовому превосходству», 24.06.2024,
<https://issek.hse.ru/news/943628872.html>
5. В Китае разработали прорывной квантовый компьютер, 09.12.2024,
<https://hightech.plus/2024/12/09/v-kitae-razrabotali-prorivnoi-kvantovii-kompyuter>
6. Categories of quantum technologies,
<https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy/appendix-categories-quantum-technologies>
7. What Types Of Quantum Computers Exist In 2024?, 06.06.2023,
<https://thequantuminsider.com/2023/06/06/types-of-quantum-computers/>
8. https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/51b/qoj849o65fbxhsly3l9l5xvaz3wd1ha/FBT_12_02_2024_V2.pdf?170774935322904136

3.2 Последние достижения и разработки в области квантовых компьютеров в мире

3.2.1 Разработки компании – лидера IBM

Компания IBM является признанным в мире лидером в области квантовых вычислений. В отчете IDC "Marketscape Worldwide Quantum Computing Systems 2023 Vendor Assessment" компания IBM названа лидером в области квантовых вычислений по итогам 2023 года, см. рисунок 3.2.1

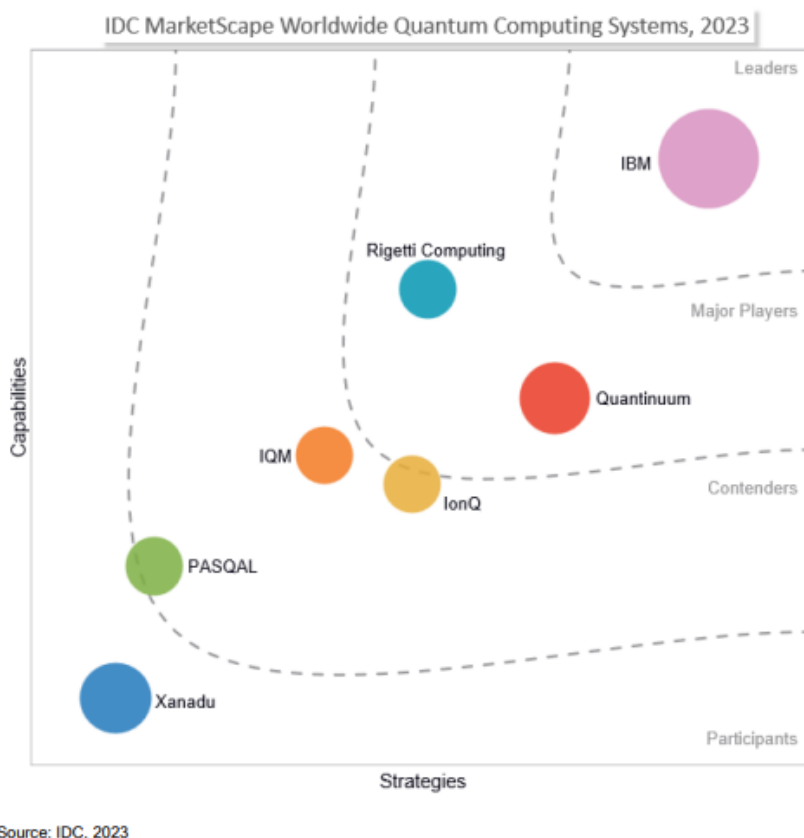


Рисунок 3.2.1- Мировая оценка поставщиков квантовых вычислительных систем в 2023 году [1].

В декабре 2023 года компания выпустила **Quantum System Two**, модульный квантовый компьютер на базе чипа Heron. Чип улучшает «коррекцию ошибок», борясь с декогеренцией - явлением, которое приводит к потере квантовых состояний в квантовой системе [2].

Этапы развития квантовых компьютеров в компании IBM

- 2021 год – квантовый процессор **IBM Eagle** – 127 кубитов;

- 2022 год – квантовый процессор **IBM Osprey** – 433 кубита, см. рисунок 3.2.3.

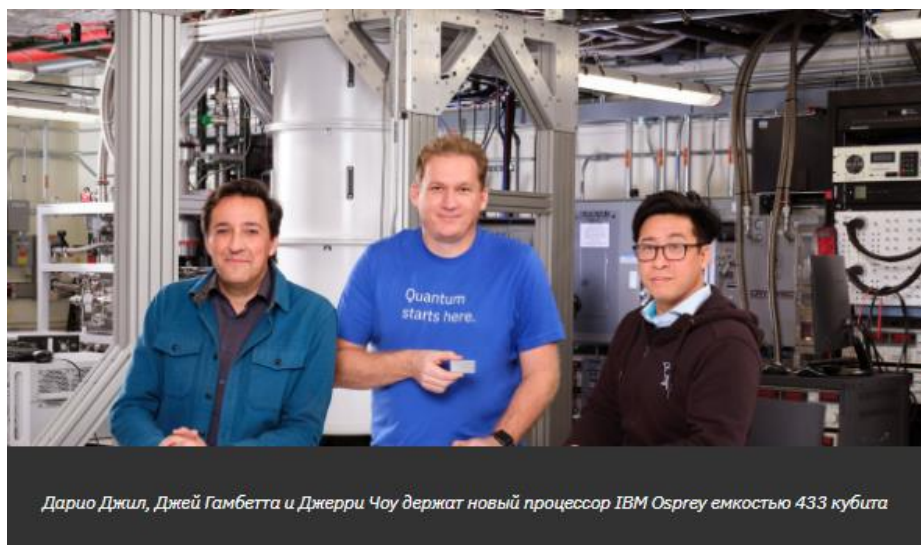


Рисунок 3.2.3- Презентация квантового процессора IBM Osprey [4].

В ноябре 2022 года также представлено обновление IBM Quantum System Two – квантовой системы следующего поколения. Она спроектирована как модульная и гибкая, объединяющая несколько процессоров в единую систему с коммуникационными каналами. Эта система станет строительным блоком квантово-центричных суперкомпьютеров - следующей волны квантовых вычислений, которая масштабируется за счет использования модульной архитектуры и квантовой коммуникации для увеличения вычислительной мощности и которая использует гибридное облачное промежуточное программное обеспечение для бесшовной интеграции квантовых и классических рабочих процессов [4]. IBM Quantum System Two находится в исследовательском центре IBM Research TJ Watson в Йорктаун-Хайтс, штат Нью-Йорк. Криогенная система позволяет квантовому компьютеру работать при температуре, близкой к абсолютному нулю.

- 2023 год – 1) квантовый компьютер Quantum Heron
2) сверхпроводящий квантовый процессор Condor (1121 кубит)
- 2024 год - Процессор R2 Heron (состоит из 156 кубитов) [5].

Ежегодно компания проводит **IBM Quantum Summit**, где демонстрирует широкую квантовую экосистему клиентов, партнеров и разработчиков компании и их непрерывный прогресс.

3.2.2 . Квантовые компьютеры других американских компаний

В начале декабря 2024 года дочерняя компания Google «**Google Quantum AI**» анонсировала свой передовой квантовый чип **Willow**, который демонстрирует коррекцию ошибок и производительность, открывающую путь к полезному крупномасштабному квантовому компьютеру.



Рисунок 3.2.4 – Изображение чипа в блоге компании [6].

Как отмечает компания в своём блоге, новейший чип позволяет добиться двух важных достижений. Первое заключается в том, что Willow может экспоненциально уменьшать количество ошибок по мере масштабирования с использованием большего количества кубитов. Это решает ключевую задачу коррекции квантовых ошибок, над решением которой ученые работали почти 30 лет. Второе - Willow выполнил стандартное эталонное вычисление менее чем за пять минут, на что одному из самых быстрых современных суперкомпьютеров потребовалось бы 10 септиллионов (то есть 10 в 25-й степени) лет - число, значительно превышающее возраст Вселенной [6].

Компания Microsoft также участвует в гонке за создание совершенного квантового компьютера и применяет уникальный подход, проектируя такую машину с новым типом кубита - **топологическим кубитом**. Предполагается, что он более стабилен, чем любой другой кубит, разработанный на сегодняшний день, что означает, что эта квантовая машина будет достаточно маленькой,

чтобы поместиться в шкафу, и достаточно быстрой, чтобы решать проблемы за дни или недели. Недавний прорыв в физике, совершенный в компании, преодолел серьезное препятствие и подтвердил, что она на правильном пути к достижению квантовых масштабов, отмечается на сайте Microsoft [7].

В сентябре 2024 года Microsoft и компания Quantinuum объявили об успешном создании, запутывании и масштабировании 12 логических кубитов с точностью двухкубитного вентиля 99,8%. Этот рубеж был достигнут с помощью машины H2 компании Quantinuum, интегрированной с системой виртуализации кубитов Microsoft, и получил известность, поскольку это был самый высокий показатель точности, приближающийся к эталону, известному как «**тройная девятка**», или порогу точности отказоустойчивых квантовых вычислений.

Microsoft и Atom Computing [8].

В 2019 году **Amazon Web Services (AWS)** основал центр квантовых вычислений в кампусе Калифорнийского технологического института.

Amazon Braket - полностью управляемый сервис квантовых вычислений, который предоставляет доступ к квантовому оборудованию от различных поставщиков, включая IonQ, Rigetti, Oxford Quantum Circuits , QuEra и собственный **Amazon Braket Quantum Simulator**. Это позволяет пользователям экспериментировать с различными аппаратными архитектурами и находить наилучшее решение для своих конкретных потребностей. Недавно AWS представила специально разработанный чип, изготовленный на собственном производстве, который может подавлять ошибки в 100 раз с помощью пассивного подхода к исправлению ошибок [9].

Компания Intel работает над созданием коммерческой квантовой системы полного стека. В 2023 году она выпустила **12-кубитный кремниевый чип Tunnel Falls**, направленный на продвижение исследований кремниевых спиновых кубитов. Компания планирует выпустить свой квантовый чип следующего поколения в **2025** году [10].

Квантовые процессоры (QPU) компании **NVIDIA** реализуют новую модель вычислений с потенциальным влиянием на все отрасли. Превращение QPU в

полезные квантовые компьютеры означает их интеграцию с современными суперкомпьютерами ИИ. Как отмечается на официальном сайте компании, NVIDIA работает с разработчиками QPU для создания таких полезных, **ускоренных квантовых суперкомпьютеров** [11].

3.2.3 Разработки квантовых компьютеров в других странах мира

Канада

Xanadu Quantum Technologies - канадская компания, занимающаяся аппаратным и программным обеспечением для квантовых вычислений.

При разработке квантовых компьютеров компания использует фотоны. Архитектура квантовых компьютеров Xanadu является модульной и способна масштабироваться до миллиона кубитов через оптическую сеть [12].

В январе 2024 г. издание о высокопроизводительных вычислениях HPCwire сообщило о завершении калибровки квантового компьютера Advantag-2 от другой канадской компании- **D-Wave Quantum Inc.** с более чем 1,2 тыс. кубитов. Ранее D-Wave заявляла также о важных результатах исследований, демонстрирующих успешное устранение квантовых ошибок (QEM) в прототипе Advantage-2 [13].

Китай

О самой последней разработке Китая в сфере квантовых компьютеров сообщения поступили в декабре 2024 года. Китай представил квантовый компьютер «**Tianyan-504**» с 504-кубитным чипом под названием «**Xiaohong**».

Квантовый компьютер разработан компанией QuantumCTek в сотрудничестве с Китайской академией наук и запущен China Telecom Quantum Group (CTQG).

«Тяньянь-504» установил новый национальный рекорд, превзойдя порог в 500 кубитов и конкурируя с международными платформами, такими как IBM, по ключевым показателям производительности, таким как время жизни кубита и точность считывания, сообщает компания CTQG, возглавлявшая проект [14].

В начале 2024 года, в январе, в Китае также был введён в эксплуатацию квантовый компьютер **Origin Wukong** [15].

Россия

Россия позже других стран приступила к разработке квантовых технологий: по-настоящему активная работа с государственной поддержкой ведется лишь последние несколько лет. В 2019 году Правительство РФ разработало дорожную карту по развитию квантовых технологий, а позже приняло решение разбить ее на три отдельные дорожные карты: по развитию квантовых вычислений, квантовых коммуникаций и квантовых сенсоров.

В феврале 2024 г. советник генерального директора «Росатома» Руслан Юнусов сообщил в интервью ТАСС: «Мы разработали 20-кубитный квантовый компьютер. Мы его реализовали **на ионной платформе**. Также у нас есть **25-кубитный компьютер на атомной платформе**. Но качество операций лучше на ионной платформе». «У нас есть планы от 50 до 100 кубитов. До конца этого года должны успеть сделать 50 кубитов.

Российский квантовый центр (РКЦ), созданный в 2016 году, в своих официальных презентациях указывал, что прототип 4-кубитного квантового компьютера на ионах был разработан в декабре 2021 года, см. рисунок 3.2.5



Источник: презентация компании на конференции в Астане 07.11.2024

Рисунок 3.2.5 – Этапы реализованных проектов РКЦ

Как видео из рисунка, 16-кубитный квантовый компьютер компания разработала в июле 2023 года.

Франция

Французская Компания PASQAL, лидер в области квантовых вычислений на нейтральных атомах, в марте 2024 года объявила о своей новейшей дорожной карте технологий.. В 2024 году PASQAL уже поставлял квантовые компьютеры конечным пользователям с более чем 100 кубитами, что позволяет им исследовать новые варианты использования и стимулировать разработку нового программного обеспечения.

План развития PASQAL предполагает создание 10 000 кубитов к 2026 году с масштабируемой архитектурой логических кубитов. Алгоритмы выходят за рамки стадии чертежей и переходят в стадию разработки, а их возможное использование в производственной среде начнется в 2025 году [18].

Использованные источники по разделу 3.2

1. IDC MarketScape: Worldwide Quantum Computing Systems 2023 Vendor Assessment, август, 2023, https://idcdocserv.com/download/US49607923e_IBM.pdf
2. IBM Debuts Next-Generation Quantum Processor & IBM Quantum System Two, Extends Roadmap to Advance Era of Quantum Utility, 04.12.2023, <https://newsroom.ibm.com/2023-12-04-IBM-Debuts-Next-Generation-Quantum-Processor-IBM-Quantum-System-Two,-Extends-Roadmap-to-Advance-Era-of-Quantum-Utility>
3. IBM Opens Its First Quantum Data Center In Europe, 01.10.2024, <https://thequantuminsider.com/2024/10/01/ibm-opens-its-first-quantum-data-center-in-europe-featuring-16x-more-performant-heron-based-systems/>
4. IBM Unveils 400 Qubit-Plus Quantum Processor and Next-Generation IBM Quantum System Two, 09.11.2022, <https://newsroom.ibm.com/2022-11-09-IBM-Unveils-400-Qubit-Plus-Quantum-Processor-and-Next-Generation-IBM-Quantum-System-Two>
5. Новый квантовый компьютер IBM решает задачи в 50 раз быстрее, 14.11.2024,

<https://hightech.plus/2024/11/14/novii-kvantovii-kompyuter-ibm-reshaet-zadachi-v-50-raz-bistree>

http://www.cnews.ru/news/top/201908_ibm_predstavila_samyj_kompaktnyj_

6. Meet Willow, our state-of-the-art quantum chip, 09.12.2024,

<https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip>

7. Microsoft quantum machine, <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/quantum-computing/technology>

8. How Microsoft And Partners Are Shaping The Future Of Quantum Computing, 05.01.2025, <https://thequantuminsider.com/2025/01/03/how-microsoft-and-partners-are-shaping-the-future-of-quantum-computing/>

9. Top 10 Quantum Computing Companies Making Change, 11.12.2023,

<https://www.forbes.com/sites/technology/article/top-quantum-computing-companies>

10. Top 10 Quantum Computing Companies Making Change, 11.12.2023,

<https://www.forbes.com/sites/technology/article/top-quantum-computing-companies>

11. <https://www.nvidia.com/en-us/solutions/quantum-computing/>

12. Xanadu Quantum Technologies , <https://www.xanadu.ai/photonics>

13. Canada Invests \$40 Million In Xanadu Quantum Technologies, 23.01.2023,

<https://thequantuminsider.com/2023/01/23/canada-invests-40-million-in-xanadu-quantum-technologies/>

14. В Китае разработали прорывной квантовый компьютер, 09.12.2024,

<https://hightech.plus/2024/12/09/v-kitae-razrabotali-prorivnoi-kvantovii-kompyuter>

15. [https://thequantuminsider.com/2024/10/08/china-expands-quantum-computing-](https://thequantuminsider.com/2024/10/08/china-expands-quantum-computing-production-line-can-now-build-8-devices-at-once/)

[production-line-can-now-build-8-devices-at-once/](https://thequantuminsider.com/2024/10/08/china-expands-quantum-computing-production-line-can-now-build-8-devices-at-once/)

16. Путеводитель по понятиям квантовой тематики, 12.02.2024,

<https://atommedia.online/reference/putevoditel-po-ponyatiyam-kvantovoj-t/>

17. Презентация Российского квантового центра – 2024,

18. PASQAL Announces New Roadmap Focused On Business Utility And Scaling Beyond 1,000 Qubits Towards Fault Tolerance Era, 12.03.2024,

<https://www.pasqal.com/news/pasqal-announces-new-roadmap-focused-on-business-utility-and-scaling-beyond-1000-qubits-towards-fault-tolerance-era/>

4 Перспективные направления использования квантовых технологий в отраслях экономики

4.1 Общая информация

Эксперты Всемирного Экономического Форума (ВЭФ) отмечают, что квантовые технологии, наряду с достижениями в таких областях как ИИ, робототехника и нанотехнологии, будут экспотенциально ускорять Четвертую промышленную революцию и окажут существенное влияние на развитие отраслей экономики и национальную безопасность. При этом выделяются три ключевые области квантовых технологий, такие как кибербезопасность, квантовое моделирование и квантовое зондирование, см. вставку 4.1

Вставка 4.1

Три ключевые области квантовых технологий по версии ВЭФ (машинный перевод)

1.Кибербезопасность

По данным Министерства внутренней безопасности США, отказоустойчивый квантовый компьютер может быть способен взломать текущее шифрование, используемое для криптографии с открытым ключом, уже к 2030 году. Это поставит под угрозу все, от личной информации людей до военных и разведывательных секретов правительств. Однако эта угроза уже активна из-за атак Store Now, Decrypt Later, в которых зашифрованные данные собираются сегодня, чтобы их можно было расшифровать, когда квантовый компьютер станет доступен.

2. Квантовое моделирование и оптимизация

Моделируя сложные молекулярные процессы, квантовое моделирование позволит добиться прорывов в фармакологии (разработка жизненно важных лекарств) и материаловедении (химикаты, необходимые для промышленности, химия аккумуляторов и т. д.). Прорывы в квантовой оптимизации также могут оказать влияние на финансовый сектор (анализ рисков и оптимизация финансового портфеля)

3. Квантовое зондирование

Квантовые датчики обладают необычайно тонкими возможностями. Когда эти датчики объединяются с искусственным интеллектом, который может сортировать огромные объемы данных, которые они генерируют, могут быть созданы захватывающие новые приложения. К ним относятся усовершенствованная технология медицинской визуализации, разведка природных ресурсов и глобальная навигация без спутников GPS.

Источник: <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/the-world-quantum-divide-why-it-matters-davos2023/> [1].

Ожидается, что квантовые технологии окажут глубокое влияние на многие крупнейшие мировые рынки - например, значительно увеличив мировую полупроводниковую промышленность. Также они окажут серьезное влияние на сектор телекоммуникаций.

Устройства квантовой синхронизации могут быть использованы на базовых станциях 5G для координации и синхронизации пакетов данных, что существенно повысит уровень защиты передаваемых данных, не слишком полагаясь на сигналы синхронизации GPS, так как квантовая связь обеспечит сверхзащищенную передачу данных.

Квантовые гравитационные датчики также позволят значительно улучшить визуализацию подповерхностных слоев, что может оказать существенное влияние на строительный сектор. Они помогут строителям выявить трубопроводы и подземные заграждения перед началом работ. Примечательно, что также ожидается ряд побочных приложений для компонентов, используемых в квантовых технологиях, таких как лазеры с узкой шириной линии для использования в спектроскопии. Ожидается, что эти устройства сами по себе создадут значительные коммерческие возможности [2].

По отраслям экономики рынок квантовых технологий сегментирован на BFSI (Banking, financial services and insurance), правительство, энергетику и коммунальные услуги, здравоохранение, автомобилестроение и другие [3].

Как отмечается в отчёте FortuneBusinessInsight, первыми последователями квантовых технологий, в частности постквантовой криптографии, стали здравоохранение, BFSI и правительство. Среди них сегмент здравоохранения занимает самую высокую долю рынка благодаря положительным коммерческим и практическим применениям технологии [3].

В современном здравоохранении критически важные данные часто обмениваются между клиниками, лабораториями и практикующими врачами. Таким образом, для инфраструктуры становится важным развертывание передовых криптографических решений. Более того, медицинские центры по всему миру устанавливают квантовые компьютеры для продвижения исследований, связанных с квантовыми технологиями, см. вставку 4.2

Вставка 4.2

Опыт использования квантовых технологий в медицине

(машинный перевод)

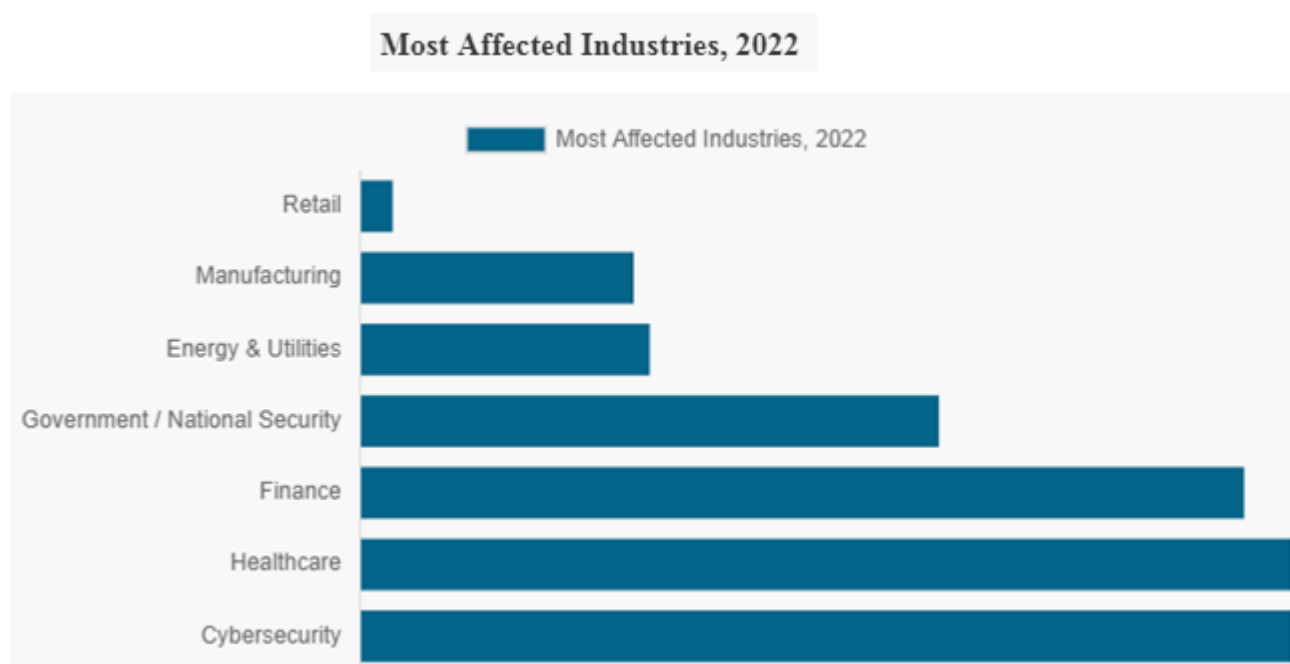
В марте 2023 года клиника Кливленда развернула квантовый компьютер IBM Quantum System One, предназначенный для медицинских исследований.

С этой установкой квантовых компьютеров в академическом медицинском центре System One стал первым квантовым компьютером под управлением IBM, развернутым на месте в частном секторе США.

Таким образом, рост коммерческих приложений, рост исследовательских проектов и позитивное внедрение криптографических решений увеличили долю сектора здравоохранения на мировом рынке.

Источник: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/quantum-cryptography-market-100211>

Распределение отраслей экономики по использованию технологий постквантовой криптографии в 2022 году представлено на рисунке 4.1.



Источник: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/quantum-cryptography-market-100211>

Рисунок 4.1. Распределение отраслей экономики по использованию квантовых технологий в 2022 году

Как видно из рисунка, технологии постквантовой криптографии в 2022 году в основном затронули сферу кибербезопасности, здравоохранение, финансы и правительственный сектор.

Большинство из вышеперечисленных отраслей имеют общие проблемы в максимальном использовании сложных наборов данных и разрастающихся требований к безопасности передачи данных по сети. Ожидается, что в ближайшие годы правительственные, BFSI и секторы здравоохранения будут занимать значительную долю рынка [3].

4.2 Квантовые технологии в медицине

В 2024 году Форум будущих технологий Росконгресса опубликовал отчет по использованию квантовых технологий в медицине, см. рисунок 5.2



Источник: [4].

Рисунок 4.2- Обложка отчета по квантовым технологиям в медицине

Отчет подготовлен коллективом авторов Российского квантового центра в партнерстве с компаниями КуБорд, QApp , QRate и QLU. Авторы отмечают, что сегодня многие квантовые разработки для медицинской сферы не только существуют в лабораториях, но и начинают выходить на рынок. Речь идет как о пилотных проектах в области квантовых вычислений в интересах крупных фармакологических компаний, так и, например, промышленных прототипах квантовых сенсоров для медицинской диагностики

В отчете приведены примеры успешного применения квантовых технологий в медицине на практике в ведущих странах мира.

2023 год

В мире начинают открываться специализированные медицинские центры, задачей которых является разработка и раннее внедрение квантовых вычислительных методов для здравоохранения. В Израиле в 2023 году появился квантовый центр для здравоохранения и наук о жизни, сооснователями которого стали компания NVIDIA, израильский стартап Classic, а также расположенная в Телль-Авиве клиника Ихилон (Сураски) – одна из первых в мире начавшая использование технологий ИИ в медицине [4].

Создание лекарственных препаратов

2023 год. IBM и Moderna работают над усовершенствованием мРНК-вакцин. Целью проекта является разработка оптимального материала для липидной оболочки, позволяющей доставить мРНК в целевую клетку. Для этого Moderna планирует использовать предобученную квантовую нейронную сеть IBM MoLFormer, которая умеет предсказывать физические свойства различных молекулярных комплексов по данным об их структуре [4].

Генетика

Отдельные фармацевтические компании уже начали экспериментировать с квантовыми вычислительными устройствами, решая задачи нахождения последовательностей генетического кода, называемых кодонами. Например, разработанная Российским квантовым центром, компанией КуБорд и компанией Genotek методика сборки генома с использованием квантовых алгоритмов значительно облегчила изучение новых видов и структурных изменений ДНК, которые не удастся обнаружить методом классического картирования, и геномных перестроек в раковых клетках [4].

Квантовое машинное обучение в медицине

Потенциал квантового машинного обучения может быть использован для открытия новых биомаркеров для лечения рака, изучение генетических заболеваний, для повышения качества изображений МРТ и других методов исследований.

2023 год. Компания QC Ware, специализирующаяся на квантовом программном обеспечении, сообщила о результатах совместного исследовательского проекта с Roche Pharma Research и INRIA CNRS- ведущими биотехнологическими компаниями [4].

Изучались возможности квантового машинного обучения в задаче анализа медицинских изображений сетчатки глаза для выявления диабетической ретинопатии и определения её типа. Исследование проводилось с помощью программного эмулятора квантового компьютера, а также с использованием до 6 кубитов квантового компьютера IBM. Результаты показали, что квантовые

алгоритмы машинного обучения оказались заметно эффективнее классических при анализе изображений с высоким разрешением [4].

Квантовые сенсоры в медицине

Квантовые сенсоры – принципиально новые устройства, использующие для измерения физических величин свойства квантовых систем. Использование квантовых состояний приводит к гораздо более высокой чувствительности квантовых датчиков относительно классических. Микроразмерные квантовые сенсоры могут использоваться для мониторинга биологических процессов внутри клеток, минимизируя воздействие на их работу за счёт своего размера. Их чувствительность и размер позволяют регистрировать температуру и магнитные поля отдельных клеток, что в свою очередь, может помочь в изучении метаболизма и исследовании электрической активности отдельных нейронов и т.д. [4].

Фундаментальные исследования в химии

Национальный научно-исследовательский институт в Японии RIKEN и Cleveland Clinic, ведущий академический медицинский центр и биомедицинский исследовательский институт, имеющий на своей территории масштабную вычислительную систему IBM Quantum System One, изучают алгоритмы для решения фундаментальных задач электронной структуры в химии.

Эти инициативы представляют собой первые шаги на пути к квантово-центрическим подходам к суперкомпьютерам для реалистичного моделирования сложных химических и биологических систем - задачи, которая исторически считалась требующей отказоустойчивых квантовых компьютеров [4].

4.3. Квантовые коммуникации

Как отмечают международные эксперты, наиболее значимых достижений в области квантовых коммуникаций (квантовой связи) добился Китай, о чем свидетельствует и динамика публикаций и патентов страны в данной сфере, см. приложение 3.

Основные достижения Китая в области квантовой связи (квантовых коммуникаций) в оценке европейских экспертов представлены во вставке 4.3.

Вставка 4.3

Достижения Китая в области квантовой связи

(машинный перевод)

КНР находится на пути к первому внедрению технологии квантовой связи

Успех Китая в квантовой коммуникации показывает, как Пекин объединяет исследователей и государственную промышленность для разработки технологии со стратегическими и безопасными последствиями. Строительство национальной сети квантовой безопасной коммуникации является как передовым мегапроектом для китайских ученых, получивших образование на Западе, так и инфраструктурным проектом, в котором участвуют государственные предприятия с прочными связями с китайским аппаратом безопасности.

Государственные инвестиции в квантовую безопасную связь стимулировали развитие отрасли. Группа под руководством Пан Цзяньвэя и других исследователей из Китайского университета науки и технологий (USTC) в Хэфэе **построила первую квантовую связь в 2004 году**, которая использовала запутанные фотоны для отправки ключа шифрования на расстояние более 125 километров из Пекина в Тяньцзинь в процессе, называемом квантовым распределением ключей (QKD). Этот метод отправки зашифрованной информации принципиально не поддается взлому без оповещения исходного отправителя и получателя сообщения, даже квантовыми компьютерами. Таким образом, квантовое распределение ключей очень привлекательно для банков и других организаций, которые полагаются на защищенную связь.

Успех USTC привел к крупному государственному проекту по созданию

национальной магистральной сети для квантовой защищенной связи, связывающей такие крупные города, как Пекин, Шанхай и Гуанчжоу.

Проект, первая фаза которого была завершена **в 2020 году**, позволил исследователям USTC коммерциализировать свою технологию и основать фирму QuantumCTek (она же Guodun Quantum 国盾量子) в 2009 году.

QuantumCTek предоставляет основное оборудование QKD, объясняет Чан Инъюн, ее генеральный директор, после чего системный интегратор строит связь, привлекая широкий круг поставщиков, включая оптоволоконные кабели и классическое коммуникационное оборудование. Вся магистральная сеть теперь имеет протяженность **12 000 километров**, и несколько прибрежных городов также создали локальные сети. Это намного больше, чем в Европе или США, где ведущими проектами являются столичная сеть вокруг Женевы и пилотная сеть между банками на Восточном побережье США.

QuantumCTek полагается на клиентов и партнеров из государственного сектора, включая китайских оборонных подрядчиков, таких как China Electronics Technology Corporation (CETC). Хотя компания никогда не получала прибыли, она успешно вышла на Шанхайскую фондовую биржу в 2020 году, чему способствовали ожидания государственных закупок продукции QuantumCTek.

В марте 2024 года China Telecom, одна из трех государственных телекоммуникационных компаний Китая, приобрела 23 процента акций компании и 41 процент голосующих акций. СМИ ожидают слияния, указывая на стимулы для государственных предприятий (ГП) поддерживать будущие отрасли и естественное соответствие телекоммуникационной компании, предлагающей защищенную связь.

Источник: <https://merics.org/en/report/chinas-long-view-quantum-tech-has-us-and-eu-playing-catch> [5].

В 2018 г. в Австрии создали квантовую сеть, имеющую полностью связанную архитектуру, в которой один источник запутанных фотонов распределяет квантовые состояния между многими пользователями, минимизируя нагрузку на

вычислительные ресурсы каждого из них. При этом сеть можно легко масштабировать на значительное число абонентов без снижения уровня безопасности [6].

Экспериментальный прототип самой передовой многоузловой квантовой сети из трех узлов в 2023 г. разработан в Китае на территории города Хэфэй [6].

В 2021 году была официально запущена первая в России межвузовская квантовая сеть с открытым доступом между корпусами Национального исследовательского технологического университета МИСиС и Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ) [7].

В августе 2024 года сингапурская телекоммуникационная компания Singtel представила первую в Юго-Восточной Азии квантовую сеть - **National Quantum-Safe Network Plus** (NQSN+). Сеть использует передовые решения квантовой безопасности для защиты предприятий от новых квантовых угроз. В сети будут использоваться современные квантово-безопасные технологии, такие как квантовое распределение ключей (КРК) и постквантовая криптография [8].

Сеть Quantum-Safe Network (QSN) поддерживает широкий спектр сетевых и защитных устройств, предлагая бесшовную интеграцию и улучшенную связь для компаний, стремящихся защитить свои коммуникации по всему Сингапуру. Эта сложная сеть также расширяет квантово-безопасную безопасность на новые приложения и варианты использования, включая службы идентификации, мобильности и аутентификации.

Сеть NQSN+ была впервые анонсирована в 2023 году. Компания Singtel начала разрабатывать сеть в партнерстве с мировым лидером отрасли компанией ID Quantique (IDQ) [8].

В США первая квантовая сеть была запущена в эксплуатацию в 2003 году. DARPA Quantum Network представляла собой 10-узловую сеть квантового распределения ключей (QKD), построенную в Массачусетсе и действовавшую с 2003 по 2007 год [9]. В последующие годы эксперты констатируют отставание США от Китая в данном направлении. Как было рассмотрено в разделе 2, в 2018

году в США была принята Квантовая инициатива, которая стимулировала государственные инвестиции в квантовые технологии.

В 2020 году офис Правительства США опубликовал свое видение развития квантовых сетей в США [10]. Документ прилагается отдельным файлом к отчёту. В нем указываются все ответственные государственные организации, отвечающие за развитие квантовых коммуникаций в стране, в том числе министерство обороны, НАСА и ЦРУ.

В Белой книге по квантовым сетям, издание которой профинансировано правительством США, указано, что в 2021 году в стране была развернута первая многоузловая квантовая сеть на основе запутанности благодаря возросшим инвестициям, см. рисунок 4.3 [9].

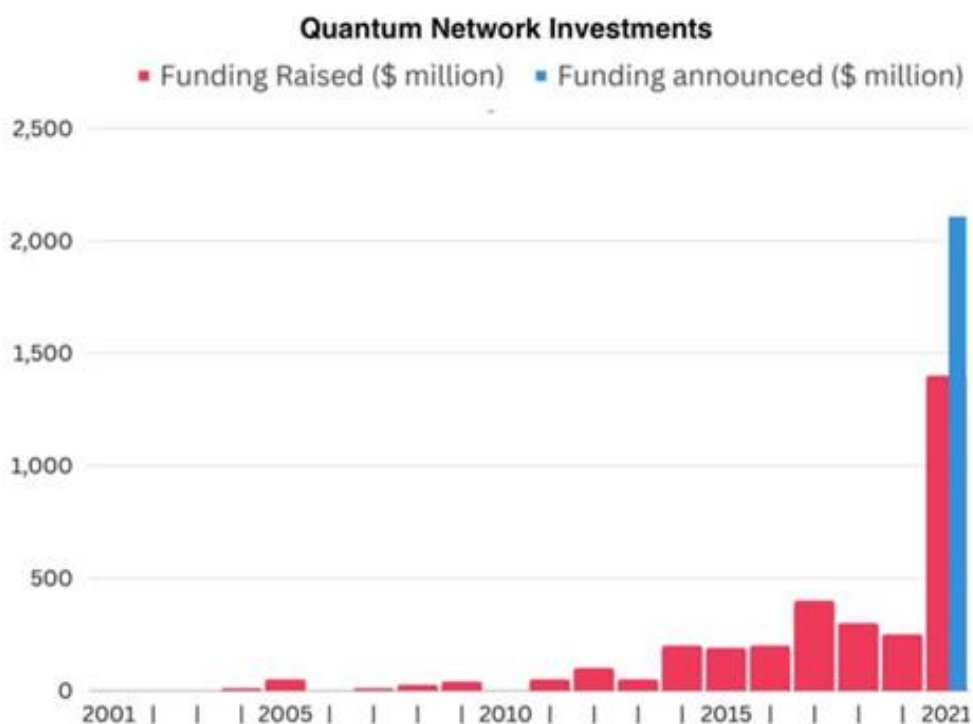


Рисунок 4.3- Динамика инвестиций в квантовые сети в США [9].

Среди разработчиков квантовой сети упоминается компания Aliro Quantum, также отмечается, что квантовые сети разворачивают в университетах.

Тем не менее, по данным McKinsey за 2022 год по государственным инвестициям США очень сильно отстают от Китая, см. рисунок 5.4

This chart represents planned, publicly announced governmental investments as of 2022, as reported by McKinsey in The Quantum Technology Monitor, April 2023. Amounts are in billions USD. This is not an exhaustive listing.

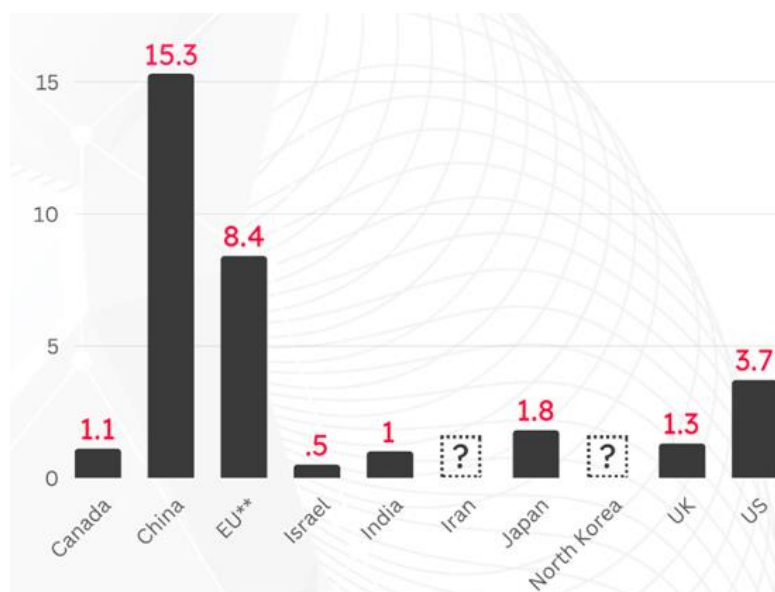


Рисунок 5.4 - Инвестиции в развитие квантовых технологий по странам [9].

Но надо учитывать, что в отличие от Китая, где преобладают государственные инвестиции, в США развитием квантовых технологий занимаются также крупные технологические компании.

Эксперты прогнозируют, что мировой рынок квантовых коммуникаций вырастет с 861,8 миллионов долларов США в 2024 году до 5 382,0 млн. долларов США к 2029 году, при темпе роста 44,2% с 2024 по 2029 год, см. рисунок 5.5.

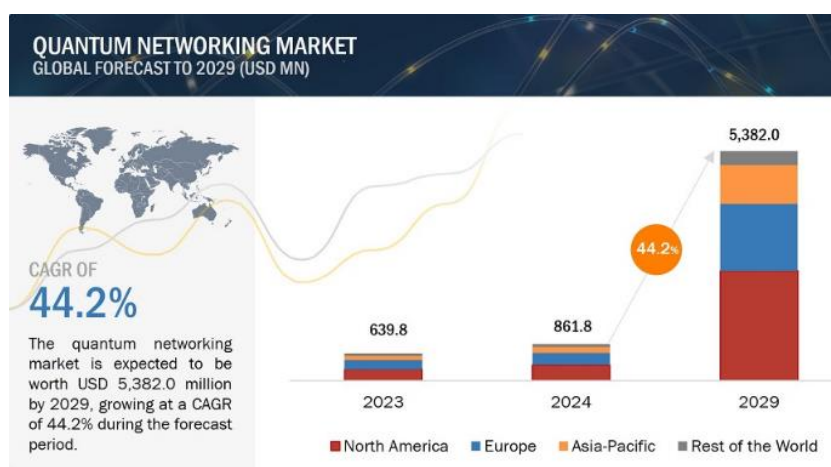


Рисунок 5.5 - Динамика рынка квантовых коммуникаций / прогноз [11].

Казахстану необходимо обратить внимание на данное научное направление.

4.4 Космическая квантовая связь (квантовый интернет)

НАСА на протяжении многих десятилетий является пионером в области космической связи, а в последнее время вышла на лидирующие позиции в области **космической квантовой связи**, выделяя новые ресурсы для ученых, инженеров и экспертов по системам связи, чтобы они могли изучать эту область [12].

Программа NASA SCaN предложила ряд концепций миссий по созданию и тестированию инфраструктуры космической квантовой связи. Они включают запуск спутников, способных отправлять и получать квантовые сигналы между наземными станциями и, в конечном итоге, другими спутниками. Эти квантовые сигналы могут быть запутанными фотонами - особенность, которая будет играть чрезвычайно важную роль в будущих сетях. Одна из таких концепций миссии показана на рисунке ниже, где квантово-способный спутник с источником запутанных фотонов соединяет межконтинентальную квантовую сеть.

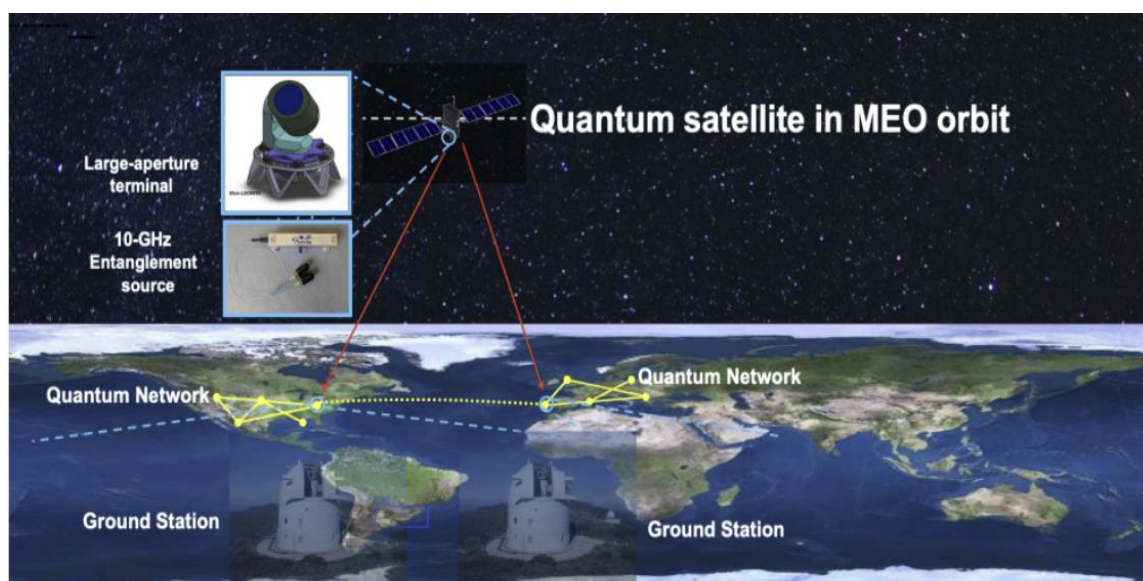


Рисунок 4.6 - Концепция миссии NASA SCaN М 2.0 для межконтинентальной квантовой связи [12].

В начале 2024 года программа NASA Space Communications and Navigation (SCaN) заказала брошюру под названием Quantum Communication 101, авторами которой стали несколько членов команды компании Quantinuum. Определение квантовых коммуникаций от Quantinuum представлено во вставке 4.4.

Брошюра «Quantum Communication 101» представлена отдельным документом в приложениях к отчёту.

Вставка 4.4

О квантовых коммуникациях

(машинный перевод)

Область квантовой коммуникации опирается на противоречащие интуиции правила квантовой физики. Благодаря невероятным достижениям инженерии, вместо непрерывных лучей света от диодов, мы теперь можем управлять отдельными фотонами, чтобы отправлять и получать квантовую информацию. Используя преимущества особых квантовых явлений, которые они демонстрируют, таких как суперпозиция и запутанность, появляются новые возможности, которые ранее были невообразимы.

Квантовые состояния света уже использовались в LIGO - крупномасштабном эксперименте, проводимом CalTech и MIT для обнаружения ряби в самой ткани пространства-времени.

Конечная цель квантовой коммуникации - это то, что многие называют квантовым интернетом, через который мы будем беспрепятственно отправлять квантовые сигналы по многим квантовым сетям. Это будет колоссальная инженерная задача, требующая международного сотрудничества.

<https://www.quantinuum.com/blog/coming-over-the-horizon-quantum-communication-enters-the-mainstream>

Путь к квантовому интернету, по мнению экспертов, будет зависеть от роста разнообразной и экспертной рабочей силы. Это хорошо понимают такие организации, как Национальный научный фонд США, который недавно объявил о создании Центра квантовых сетей стоимостью 5,1 миллионов долларов, нацеленного на разработку архитектуры квантового интернета [12].

За последние несколько лет наблюдается рост инвестиций в квантовые технологии по всему миру.

Важные промышленные инвестиции делают такие крупные корпорации, как IBM, Google, Intel, Honeywell, Cisco, Amazon и Microsoft. На создание китайской Национальной лаборатории квантовой информатики выделено более 11 млрд. долларов, отмечают эксперты европейского центра изучения Китая [5].

В конце 2020 года Госкорпорация «Ростех» сообщила, что присоединилась к научно-исследовательскому проекту **БРИКС** по квантовым коммуникациям. Впервые планировалось создать **межконтинентальный спутниковый канал квантовой связи** с применением новейших элементов макро- и волоконной оптики, который покроет расстояние **более 10 тыс. км** [13].

Работы по созданию экспериментальных компонентов оборудования и инфраструктуры гибридных каналов квантовых коммуникаций на основе технологии волоконно-оптической и спутниковой связи проводятся международным научным консорциумом, куда вошли эксперты из ЮАР, Индии, Китая и России. Проект реализуется в рамках международного гранта БРИКС при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. От России в нем участвует «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» [13].

В декабре 2023 года Китай и Россия испытали квантовую спутниковую связь. Западные эксперты считают, что Китай может открыть свою квантовую сеть для международных партнеров, это может быть распространено, прежде всего, на страны БРИКС. Процесс форсируется после глобальной рекламы BeiDou, китайской альтернативы американской спутниковой навигационной системе GPS [5].

В июне 2019 года 26 государств-членов ЕС подписали «Декларацию EuroQCI», согласившись работать вместе при поддержке ESA (European Space Agency - Европейского космического агентства) над развитием инфраструктуры квантовой связи, охватывающей весь Евросоюз. Новая сеть **EuroQCI** займется интеграцией квантовых технологий и систем в наземные оптоволоконные сети связи и будет включать космический сегмент, обеспечивающий полное покрытие Евросоюза (ЕС) и других континентов [14].

В 2021 году Европейская комиссия выбрала консорциум ведущих компаний и исследовательских институтов для изучения проекта будущей европейской квантовой коммуникационной сети EuroQCI (European Quantum Communication Infrastructure – «Европейская квантовая коммуникационная инфраструктура»). В долгосрочном плане EuroQCI станет основой квантового интернета в Европе, соединяя квантовые компьютеры, симуляторы и датчики через квантовые сети для распространения информации и ресурсов с использованием самых современных методов безопасности [15].

European Quantum Communication Infrastructure (Европейская квантовая коммуникационная инфраструктура). Европейский консорциум, возглавляемый концерном Airbus, состоит из следующих компаний и организаций:

- Leonardo – один из крупнейших машиностроительных холдингов в Италии;
- Orange – французская телекоммуникационная компания, оператор сотовой связи, а также интернет-провайдер;
- PwC France и Maghreb – французское подразделение PricewaterhouseCoopers (PwC), международной сети компаний, предлагающих услуги в области консалтинга и аудита;
- Telespazio – совместное предприятие холдинга Leonardo и Thales;
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – Национальный исследовательский совет, крупнейший исследовательский совет в Италии, в задачи которого входит поддержка научных и технологических исследований (штаб-квартира находится в Риме);
- Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) – Национальный институт метрологических исследований, Италии.

В марте 2023 года Правительство Индии объявило о запуске первой в стране сети квантовой связи. Она действует между Санчар Бхаваном и офисом Национального центра информатики (NIC) в комплексе центральных правительственных учреждений (CGO) в Дели [16].

4.5 Квантовые спутники

Квантовый спутник - это спутник связи, который использует квантовую физику для защиты своих сигналов. В данной сфере также лидирует Китай.

Правительство Китая поставило перед своими учеными задачу по покрытию больших расстояний квантовыми спутниками. Первый китайский квантовый спутник Micius был запущен ещё в 2016 году. Он был разработан командой из USTC и Венского университета и обеспечил первую в мире квантово-шифрованную связь между континентами.

В рамках мегапроекта S&T в области квантовых вычислений и связи **второй спутник, Jinan-1**, был выведен на низкую околоземную орбиту **в июле 2022 года**. Этот микроспутник весит одну шестую часть Micius, но имеет на 2-3 порядка большую точность квантовой связи. **Китай планирует запустить третий квантовый спутник к 2026 году**. Этот спутник должен достичь больших высот, что требует более мощных лазеров и более высокой точности.

Интеграция квантовых спутников Китая и магистральной сети является примером усилий Китая по созданию интегрированной информационной сети «космос-земля», отмечают эксперты. Такая всеобъемлющая, безопасная, надежная и глобальная цифровая сеть, охватывающая море, сушу, воздух и космос, является долгосрочной целью Коммунистической партии Китая с очевидными военными и связанными с безопасностью последствиями [5].

Планы по разработке квантовых спутников имеет и Индия. Национальная квантовая миссия Индии (NQM) ставит своей целью запустить квантовый спутник через 2-3 года, продвигая безопасную связь посредством квантовой физики. Эта инициатива выводит Индию на передовые позиции в области технологий следующего поколения [17].

Министерство энергетики США в январе 2025 года также сообщило, что расширяет сотрудничество в области квантовой физики в космосе с компаниями Boeing, Axiom Space, USRA, Vescent и Qrypt [18]. Как известно, в

структуре Министерства работают авторитетные исследовательские лаборатории: Аргоннская, Ливерморская, Лос-Аламосская, Айдахо и другие.

Приоритетом совместных исследований в сфере квантовой физики будет квантовое зондирование и квантовые коммуникации. Квантовая гонка в космосе началась, отмечается в сообщении [18].

Таким образом, использование квантовых технологий в первую очередь имеет значение для защиты данных, развития спутниковой связи и ДЗЗ, фармацевтики, медицины, авиа и ракетостроения, биохимии, микроэлектроники, энергетики, см. таблицу 4.1.

Таблица 4.1—Потенциал использования квантовых технологий по отраслям

Отрасли экономики	Квантовые технологии			
	Квантовые вычисления	Квантовые коммуникации	Постквантовая криптография	Квантовые сенсоры
Фармацевтика	√			
Медицина	√		√	
Аэрокосмическая	√	√	√	√
промышленность				
Информационные технологии	√	√	√	
Микроэлектроника	√	√	√	√
Биохимия	√	√	√	√
Автомобильная	√	√	√	√
промышленность				
Энергетика	√	√		

Составлено по данным исследований НИУ ВШЭ

Согласно отчету McKinsey & Company за апрель 2023 года, экономический прогноз квантовых вычислений к 2035 году оценивается в пределах от 620 млрд до 1,27 трлн долларов только для 4 отраслей: химическая промышленность, финансы, науки о жизни и автомобилестроение [19].

Использованные источники по разделу 4

1. The world is heading for a 'quantum divide': here's why it matters, 18.01. 2023, <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/the-world-quantum-divide-why-it-matters-davos2023/>
2. National Quantum Strategy, <https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy>
3. Quantum Cryptography Market Size, Share & Industry Analysis
<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/quantum-cryptography-market-100211>
4. Квантовые технологии для медицины. Новые подходы в вычислениях, защите данных и сенсорики, 13.02.2024,
https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/51b/qoj849o65fbxhsly3l9l5xvaz3wd1ha/FBT_12_02_2024_V2.pdf?170774935322904136
5. China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up, 14.12.2024, <https://merics.org/en/report/chinas-long-view-quantum-tech-has-us-and-eu-playing-catch>
6. Топ-10 перспективных технологий квантовой связи, 12.07. 2024, <https://issek.hse.ru/news/943640993.html>
7. В России запустили квантовую сеть, открытую для присоединения, 14.10.2021, https://www.cnews.ru/news/top/2021-10-14_v_moskve_ofitsialno_zapustili_
8. В Азии запущена первая коммерческая квантовая сеть связи, 09 августа 2024, https://www.cnews.ru/news/top/2024-08-09_zapushchena_pervaya_v_yugo-vostochnoj
9. A Strategic Vision for America's quantum Networks, <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/01/A-Strategic-Vision-for-Americas-Quantum-Networks-Feb-2020.pdf>
10. Real-life quantum network deployments, <https://www.aliroquantum.com/real-world-quantum-network-deployments-white-paper>

- 11.** Post-Quantum Cryptography (PQC) Market, 12.10.2024,
<https://www.forinsightsconsultancy.com/reports/post-quantum-cryptography-market>
- 12.** Quantum Communication Enters the Mainstream, 30.07.2024,
<https://www.quantinuum.com/blog/coming-over-the-horizon-quantum-communication-enters-the-mainstream>
- 13.** «Ростех» вступил в проект БРИКС по созданию межконтинентального канала квантовой связи, 29.10.2020, https://www.cnews.ru/news/line/2020-10-29_rosteh_vstupil_v_proekt
- 14.** Квантовый интернет Европы, 07.06.2021, <https://www.connect-wit.ru/kvantovyj-internet-evropy.html>
- 15.** The European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative,
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>
- 16.** Indian Government Announces Quantum Networks, 29.03.2023,
<https://thequantuminsider.com/2023/03/29/indian-government-announces-quantum-networks-challenges-ethical-hackers-to-break-encryption/>
- 17.** What is the quantum satellite for India's National Quantum Mission?, 20.12.2024,
<https://www.thehindu.com/sci-tech/science/what-is-the-quantum-satellite-for-indias-national-quantum-mission-explained/article69003757.ece>
- 18.** DOE Announces Expansion of the Quantum in Space Collaboration, 17.01.2025,
<https://www.energy.gov/technologytransitions/articles/doe-announces-expansion-quantum-space-collaboration>
- 19.** How the world map of quantum computing is looking, 2024,
<https://www.bbva.com/en/innovation/how-the-world-map-of-quantum-computing-is-looking/>

5.Использование квантовых технологий в сфере национальной безопасности

Исторически сложилась, что научно-технологическое развитие идёт форсированными темпами в первую очередь в сфере безопасности и военном секторе, а потом разработки находят применение в гражданской сфере. Ярким примером служит Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (Defense Advanced Research Projects Agency или DARPA) и исследовательская организация НАТО «Science & Technology Organization» (STO), которые располагают значительными финансовыми ресурсами для развития научных проектов по перспективным для безопасности направлениям.

В начале 2020 года НАТО впервые был опубликован коллективный труд ученых по исследованию технологических трендов и развития науки в мире на период до 2040 года. Эта оценка опирается на коллективный взгляд организации НАТО по науке и технологиям (STO), ее совместную сеть из более чем 6000 активных ученых, аналитиков, исследователей и инженеров, а также связанных исследовательских объектов.



Science & Technology Trends 2020-2040

Exploring the S&T Edge

NATO Science & Technology Organization

Рисунок 5.1- Обложка отчета НАТО [1].

Цель опубликованного отчёта - помочь нынешним и будущим военным и гражданским лицам, принимающим решения, понять новые и прорывные технологии.

В докладе используется широкий круг отчетов с открытым исходным кодом, внутренние оценки и исследования перспектив развития для выработки всестороннего понимания будущего технологического ландшафта.

Восемь сильно взаимосвязанных областей науки и техники были названы основными стратегическими разрушителями в течение следующих 20 лет.

Среди стратегических прорывных (подрывных) технологий в отчёте были указаны квантовые технологии.

По мнению экспертов разрушительные, прорывные эффекты, скорее всего, будут происходить через комбинации всех технологий и сложных взаимодействий между ними, в том числе:

- **Data-Quantum:** в течение 15–20 лет квантовые технологии увеличат объем данных и возможности их обработки и использования;
- **Space-Quantum:** космические квантовые датчики приведут к совершенно другому классу датчиков, пригодных для развертывания на спутниках [1].

В таблице 5.1 представлена оценка Квантовых технологий экспертами НАТО, их влияния и горизонт использования.

Таблица 5.1 - Quantum 2020-2040

EDT	Technology Focus Areas	Impact	Attention	TRL	Horizon
Quantum	Communication	High	Trigger	5	2030
	Information Science	Revolutionary	Trigger	4	2035
	Precision Navigation	High	Disillusionment	6	2025
	Sensors	Moderate	Trigger	3	2040

Источник: [1].

Уже в январе 2024 года организация НАТО опубликовала Резюме своей первой квантовой стратегии «Summary of NATO's Quantum Technologies Strategy», см. вставку 5.1.

Вставка 5.1

Фрагмент квантовой стратегии НАТО

(машинный перевод)

Стратегическое видение:

Альянс, готовый к квантовым технологиям

Чтобы стать готовым к квантовым технологиям альянсом, НАТО и союзники будут способствовать развитию безопасной, устойчивой и конкурентоспособной **квантовой экосистемы**, способной реагировать на быстрый темп технологической конкуренции в квантовой отрасли. Это требует согласованности в инвестициях, сотрудничества между союзниками в возможностях развития технологий, развития и защиты квалифицированной рабочей силы, а также повышения ситуационной осведомленности и обмена информацией. Это также потребует разработки и внедрения критически важных технологий, необходимых для квантовых технологий. Не менее важно сдерживать и защищать наши собственные системы и сети от квантовых и других атак

Источник: https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm [2].

Среди девятнадцати политических заявлений, в которых в общих чертах описываются цели НАТО в области квантовых технологий, пять непосредственно посвящены постквантовой криптографии. Подробнее текст стратегии НАТО представлен в приложении 7 к отчёту.

Отмечается, что у НАТО есть Трансатлантическое квантовое сообщество для стратегического взаимодействия с правительством, промышленностью и научными кругами во всех инновационных экосистемах.

Ещё в 2022 году Центр кибербезопасности НАТО, отвечающий за повседневную защиту сетей альянса, успешно протестировал безопасные потоки передачи с использованием виртуальной частной сети (VPN), предоставленной британской фирмой Post-Quantum.

В ноябре 2023 года НАТО провело учения по «квантово-устойчивому» шифрованию в рамках учений 5G на полигоне в Латвии [3].

В 2024 году появилось сообщение, что организация НАТО уже перевела свои криптографические системы на квантово-безопасную криптографию [4].



С тех пор как NIST опубликовал 13 августа 2024 года свои окончательные, утвержденные спецификации для первых трех алгоритмов PQCS, у НАТО появился набор протоколов PQCS для быстрой работы [4].

В августе 2024 года швейцарская фирма Terra Quantum, которой принадлежит рекорд по дальности передачи информации с использованием технологий QDK подписала контракт с ВВС США на разработку квантовой коммуникационной сети в Америке [5].

Квантовое распределение ключей (QKD) было использовано в Вооруженных силах Индии. В июне 2023 года QNu Labs и ВМС Индии объединились для развертывания крупномасштабных систем квантового шифрования. Благодаря этому сотрудничеству ВМС Индии стали первым агентством в стране, которое обеспечило безопасность систем на основе квантового распределения ключей (QKD) [6].

Проекты квантовых вычислений для ВМФ разрабатываются с учетом того, что традиционным вычислительным системам не хватает эффективности в таких элементах, как навигация подводных лодок и подводная связь. Более того, исследования квантовых вычислений, проводимые военными учреждениями, прогрессируют с открытиями, касающимися ИИ, машинного обучения, систем поддержки принятия решений и т. д.

Квантовые датчики способны обнаруживать чрезвычайно малые изменения физических параметров, таких как:

- Магнитные поля
- Электрические поля

Это делает их идеальными для таких применений, как обнаружение подводных лодок противника или обнаружение мин.

Кроме того, квантовые датчики могут также измерять очень слабые сигналы, что делает их полезными для таких задач, как мониторинг радиосвязи. В результате квантовое зондирование играет все более важную роль в военных операциях по всему миру [7].

Как отмечают эксперты, ожидается, что рост квантовых вычислений в аэрокосмической и оборонной промышленности будет расти большими темпами, так как оба сектора увидели потенциал квантовых технологий и планируют инвестировать в их развитие. Это означает, что посредством принятия квантовых технологий в военных целях аэрокосмическая и оборонная промышленность может улучшить радарную, ракетную, а также технологию наблюдения [8].

Использованные источники по разделу 5

1. Science & Technology Trends 2020-2040, NATO Science & Technology Organization, Brussels, March 2020, <http://www.nato.int>
2. Summary of NATO Quantum Strategy, 17.01.2024, https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm
3. NATO hosted 'quantum-resistant' encryption exercise in 5G drill at site in Latvia, 01.11.2023, <https://www.insidequantumtechnology.com/news-archive/quantum-news-briefs-november-1-nato-hosted-quantum-resistant-encryption-exercise-in-5g-drill-at-site-in-latvia-pasqal-to-support-creation-of-research-chair-in-quantum-computing-at/>
4. NATO's Quantum-Safe Future Transition, 14.10.2024, <https://quantumcomputingreport.com/natos-quantum-safe-future-transition/>

5. China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up, 14.12.2024, <https://merics.org/en/report/chinas-long-view-quantum-tech-has-us-and-eu-playing-catch>
6. Quantum Cryptography Market Size, Share & Industry Analysis, 01.01.2025, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/quantum-cryptography-market-100211>
7. Quantum Technology in the Military, 01.02.2023, <https://nstxl.org/quantum-technology-in-the-military>
8. <https://www.defence-industries.com/articles/the-integration-of-quantum-computing-in-military-applications>
9. Ученые США впервые осуществили квантовую телепортацию через обычные интернет-кабели, 22.12.2024

6. Выводы по отчёту и рекомендации по развитию квантовых технологий в Казахстане

Анализ опыта развитых стран в сфере квантовой науки и технологий продемонстрировал колоссальное отставание Казахстана по данному высокотехнологичному направлению.

По состоянию на декабрь 2024 года ни в одном стратегическом документе страны квантовые технологии не упоминаются даже одной строкой, в то время как многие государства имели стратегическое видение по развитию квантовых технологий ещё 10 лет назад. А в последние два года ведущие державы уже обновляют свои национальные программы и стратегии в данной сфере и говорят о промышленном использовании QT.

Об угрозах такого большого разрыва между странами, экономических и политических последствиях, предупреждают эксперты ВЭФ, см. стр. x

Не рассматривая квантовые технологии в качестве приоритетного технологического направления, Казахстан в ближайшей перспективе не сможет должным образом развивать информационные технологии и программу

«Киберщит Казахстана», защитить свои критически важные объекты инфраструктуры.

В то время как правительства Австралии, Великобритании, Канады, США и других стран, уделяют внимание развитию образования в сфере квантовых технологий начиная со школы, выделяют стипендии для аспирантов, в Казахстане по данному направлению на 2024 год даже не выделено ни одного гранта на научные исследования.

Это связано с тем, что длительное время направление по развитию QT в Республике Казахстан не было признано приоритетным. И только по результатам форсайта в сфере ИКТ, организованном Национальной Академией наук в 2024 году, казахстанские эксперты обратили внимание на важность развития квантовых технологий в стране. Но данный факт ещё не нашёл отражения в стратегических документах.

В связи с вышеизложенными фактами **рекомендуется следующее:**

- Сформировать рабочую группу (или консультативный Совет) по развитию квантовых технологий в Казахстане для разработки Национальной стратегии.
- Провести аудит разработок казахстанских ученых в области квантовой физики, квантовых вычислений и квантовой криптографии для определения кадрового потенциала на текущий период;
- Изучить учебные программы по квантовым технологиям (по направлениям) в ведущих вузах мира для их адаптации к условиям Казахстана;
- Формирование базы знаний по квантовым технологиям для повышения компетенций профессорско-преподавательского состава и исследователей.
- Стимулирование исследований в сфере квантовых технологий через гранты и стипендии;
- Особое внимание обратить на развитие QT в сфере национальной безопасности.

Так как квантовые технологии требуют значительных финансовых средств, рекомендуется создание исследовательских консорциумов по опыту США и России в Казахстане, или вхождение казахстанских ученых в уже существующие международные группы. Также целесообразно на первом этапе использовать

квантовые облачные платформы технологических компаний США и Китая, что позволит исследователям изучать их приложения без необходимости дорогостоящих инвестиций в оборудование.

Использовать опыт Канады по распределению ролей при реализации Квантовой Стратегии:

Правительство - Финансирование, снижение рисков и создание поддерживающих политических рамок для новых технологий, организация и координация, закупка товаров и услуг и выполнение функций партнера по исследованиям.

Академия наук - Развитие талантов, проведение крупномасштабных прикладных исследований и разработок (R & D), и расширение границ знаний.

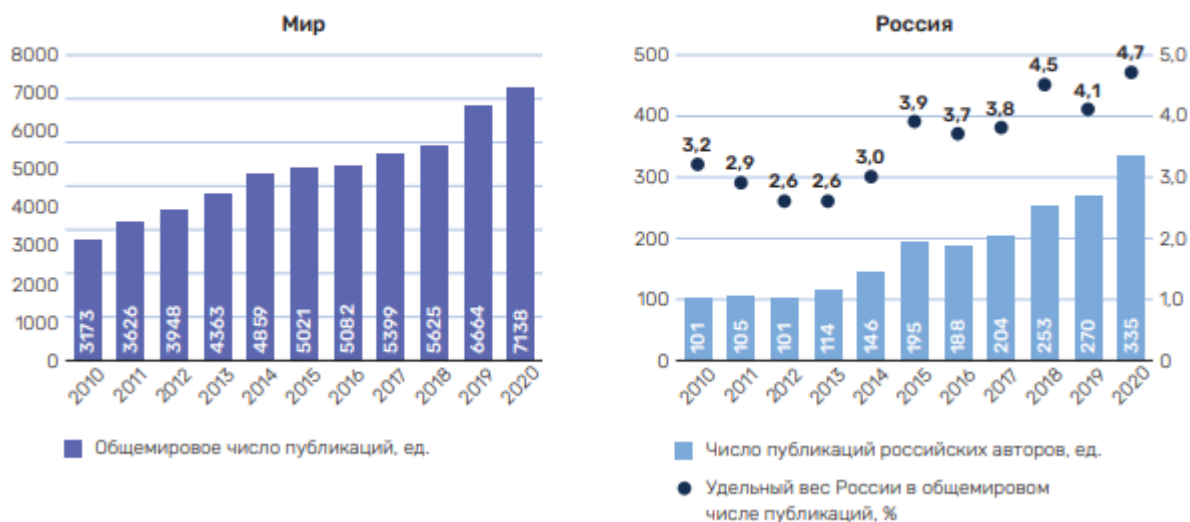
Промышленность - Вывод новых технологий на рынок, подключение к глобальным цепочкам поставок, экспорт квантовых продуктов и услуг и внедрение новых технологий.

Некоммерческий сектор - Организация и координация мероприятий в поддержку квантовых исследований и коммерциализации, включая образование, осведомленность, ускорение и инкубацию, а также проведение адвокации.

Публикационная и патентная активность по научному направлению «квантовые вычисления» в мире и России за 2010-2020 годы

4. Квантовые вычисления – публикационная

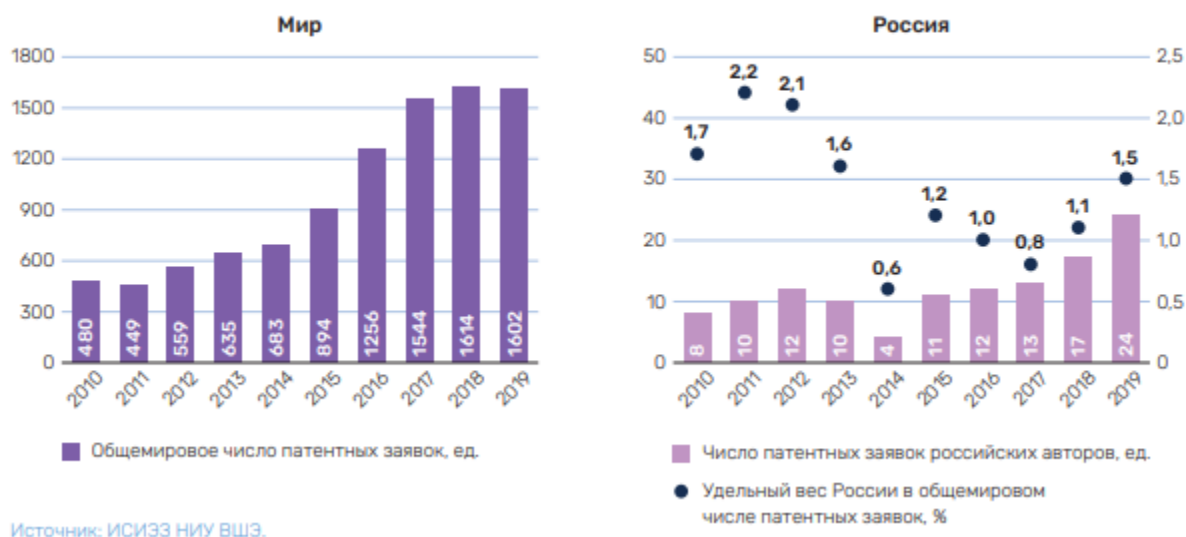
Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности



стр. 74

Квантовые вычисления –патентная активность

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности

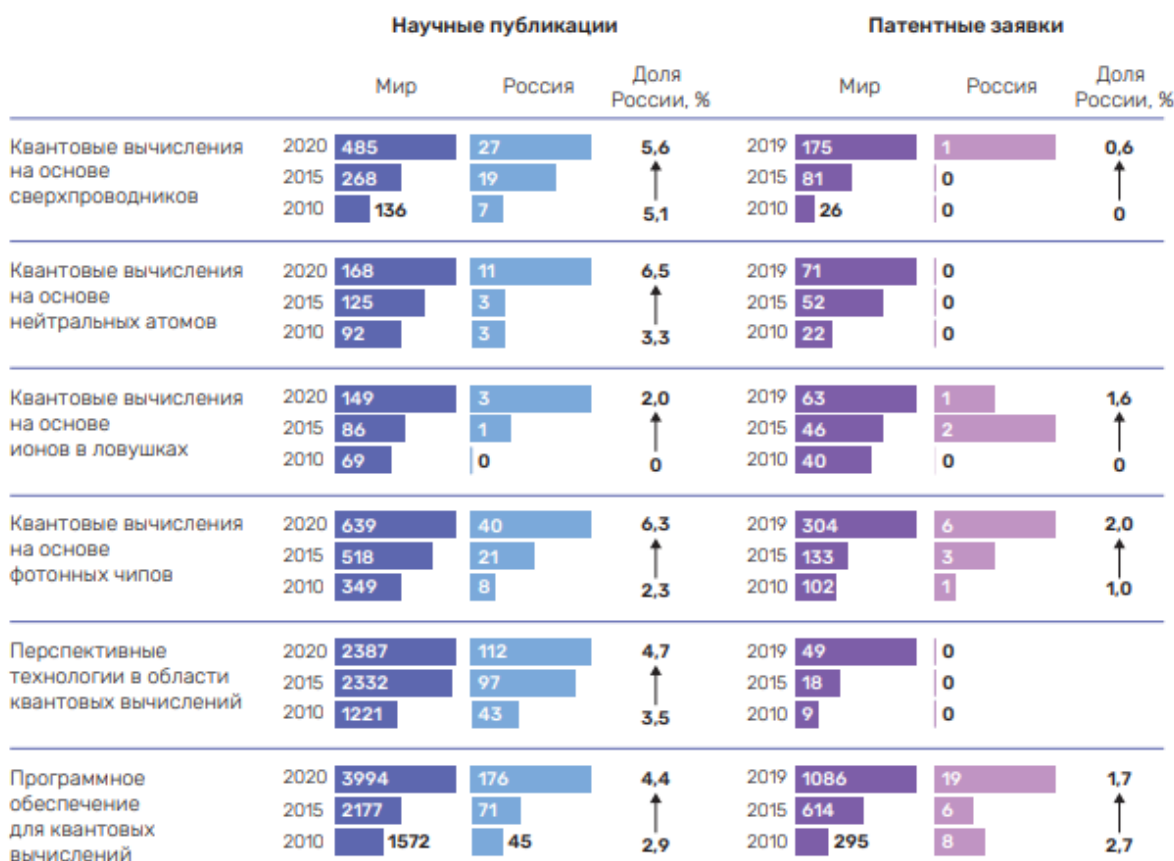


Источник: ИСИЗЗ НИУ ВШЭ.

стр. 75

https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_opublikovalo_beluyu_knigu_vysokih_tehnologiy_v_rossii_i_za_rubezhom.html

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий



стр. 79

Источник: Развитие отдельных высокотехнологичных направлений, Москва, 2022, https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_opublikovalo_b_eluyu_knigu_vysokih_tehnologiy_v_rossii_i_za_rubezhom.html

Патентный ландшафт квантовых вычислений: обзор патентной деятельности за 2004-2023 годы

(машинный перевод)

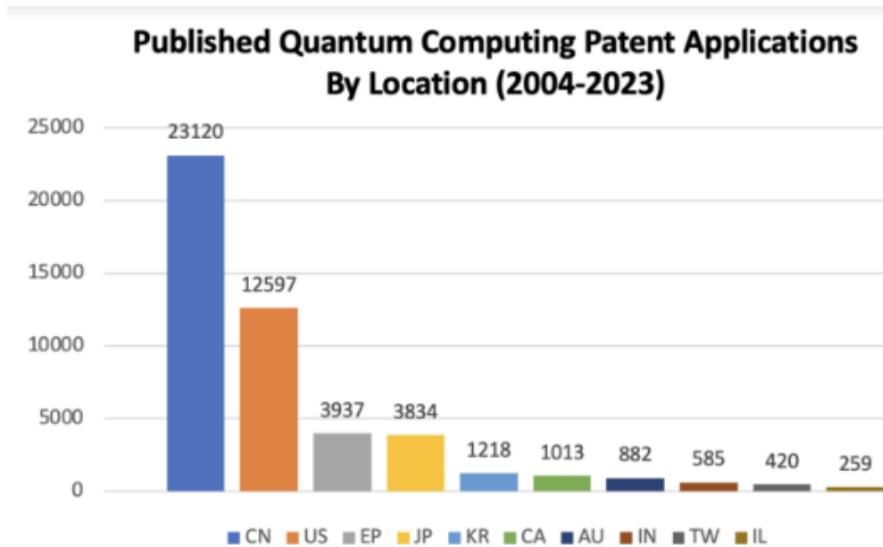
2023 год ознаменовал собой еще один год быстрого развития квантовых вычислительных технологий, продемонстрировав значительный прогресс в таких ключевых областях, как масштабируемые квантовые вычисления и квантовая коррекция ошибок. Разрабатываются многочисленные подходы к физической реализации или методы создания квантовых битов (кубитов), предлагающие различные компромиссы в показателях производительности, таких как количество кубитов, частота ошибок, время декогеренции и скорость вентиля.

Патентная деятельность является эффективным индикатором скорости инноваций и распределения ресурсов в технологической области.

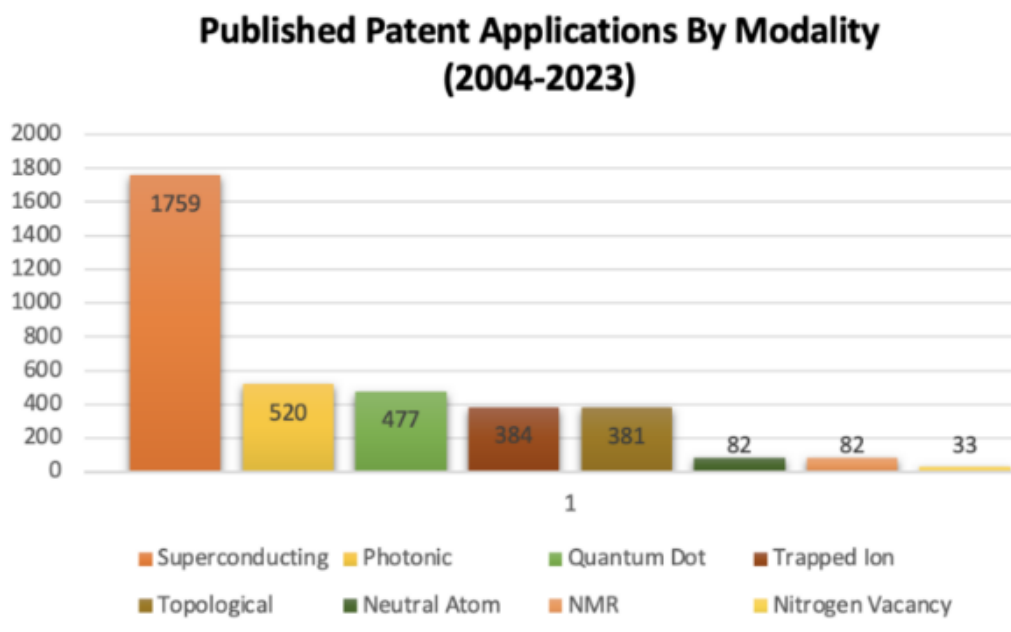
В начале 2024 года были рассмотрены новейшие направления развития и тенденции в индустрии квантовых вычислений через призму ее патентного ландшафта и обсуждаются стратегические соображения по патентованию в этой быстро развивающейся области.

Как показано ниже, Национальное управление интеллектуальной собственности **Китая (CNIPA)** лидирует по количеству опубликованных **патентных заявок на квантовые вычисления**, за ним следуют Патентное и товарное ведомство **США (USPTO)**, Европейское патентное ведомство (**EPO**) и Патентное ведомство **Японии (JPO)**. Значительное количество патентных заявок на квантовые вычисления было также подано в патентные ведомства Южной Кореи, Канады, Австралии, Индии, Тайваня и Израиля. Хотя компании имеют возможность подавать патенты по всему миру, существует тенденция отдавать приоритет подаче заявок в своих странах, а затем стратегическим заявкам на ключевых зарубежных рынках.

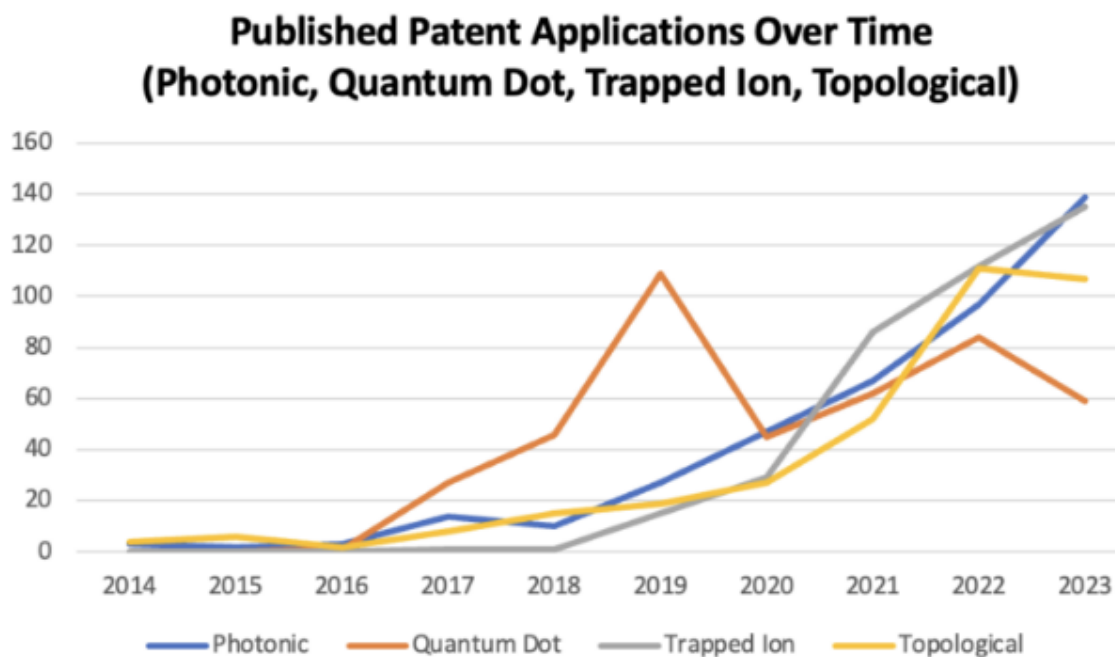
Такая схема распределения патентных заявок предполагает лидерство Китая, США, Европы и Японии в исследованиях и инвестициях в квантовые вычисления.



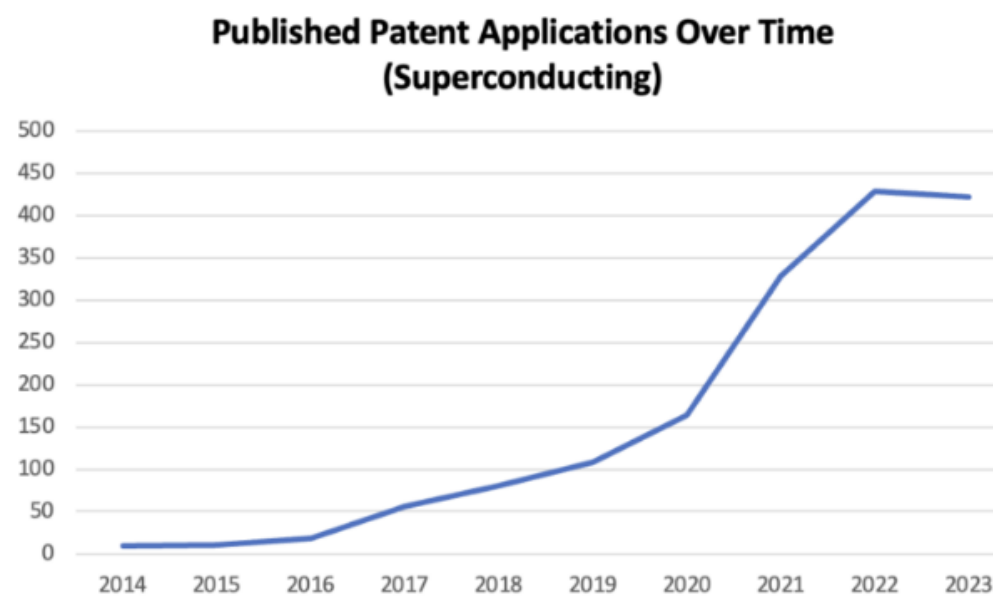
На диаграмме ниже показано распределение патентных заявок, направленных на ведущие квантовые компьютерные модальности (патентная заявка классифицируется как направленная на определенную модальность, если ее аннотация или формула изобретения содержат ключевые слова, связанные с этой модальностью).



Количество патентных заявок, направленных на сверхпроводящие квантовые вычисления, почти соответствует общему количеству других модальностей вместе взятых. Это говорит о том, что сверхпроводящие квантовые вычисления являются наиболее зрелым в коммерческом плане подходом и отражают влияние находчивых крупных корпораций, которые лидируют в этой области. После сверхпроводящих квантовых вычислений наибольшее количество патентных заявок приходится на технологии, основанные на фотонных, квантовых точках, захваченных ионах и топологических методах. Относительно небольшое количество патентных заявок на нейтральные атомы, ядерный магнитный резонанс и квантовые вычисления на вакансиях азота указывает на то, что эти технологии в основном разрабатываются академическими учреждениями и компаниями на ранней стадии. Ниже проиллюстрированы тенденции в подаче патентных заявок по различным подходам к физической реализации квантовых вычислений.



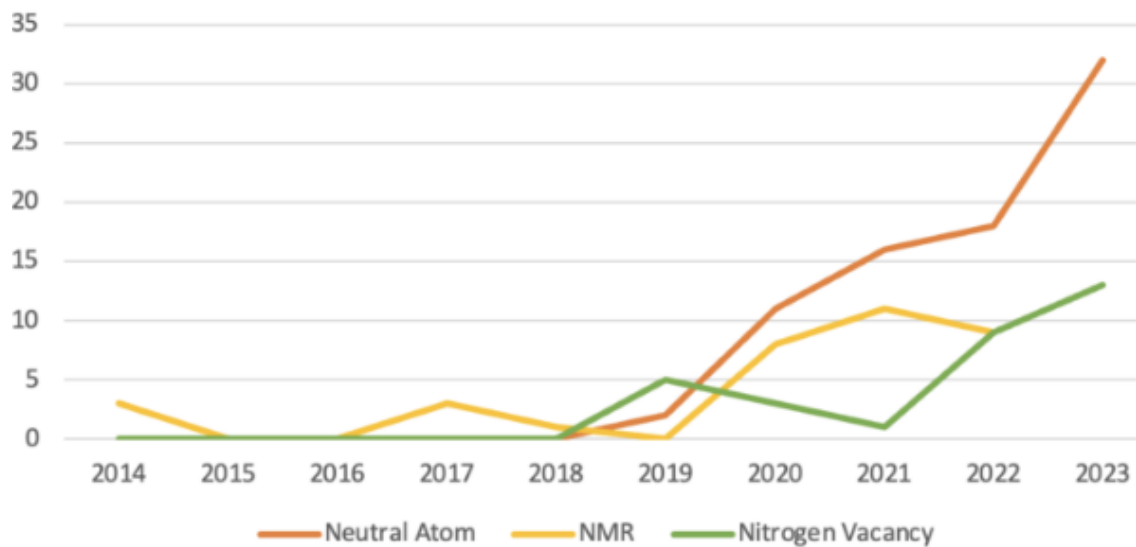
Хотя количество опубликованных патентных заявок на сверхпроводящие квантовые вычисления в целом демонстрирует здоровую тенденцию к росту, в 2023 году наблюдается заметное небольшое замедление.



Темпы публикации патентных заявок для фотонных и захваченных ионами квантовых вычислений быстро растут. Топологические квантовые вычисления испытали небольшое снижение патентных публикаций в 2023 году. Примечательно, что технология квантовых точек достигла пика в публикациях патентных заявок в 2019 году, за которым последовала тенденция к снижению, что потенциально указывает на снижение интереса к этой области.

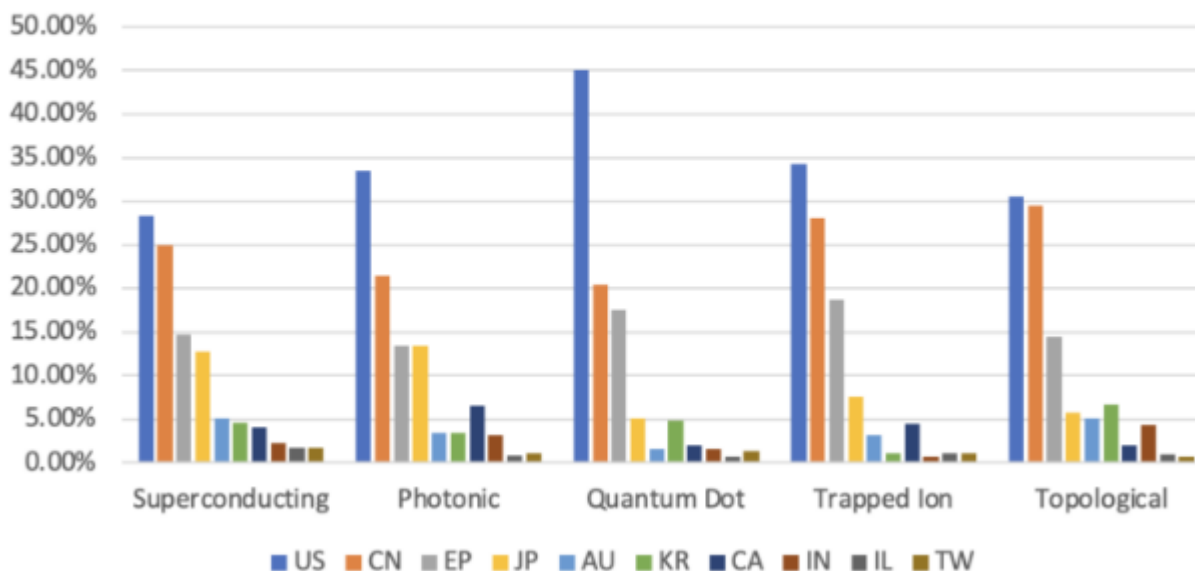
Несмотря на небольшое количество, патентные заявки на нейтральные атомы, ЯМР и квантовые вычисления с азотными вакансиями в последние годы быстро растут. Примечательно, что модель роста в области нейтральных атомных квантовых вычислений очень похожа на модель фотонных и захваченных ионов квантовых вычислений, но с трехлетней задержкой. Эта тенденция указывает на потенциал нейтральных атомных квантовых вычислений стать основным подходом.

Published Patent Applications Over Time (Neutral Atom, NMR, Nitrogen Vacancy)



На следующей диаграмме показано количество патентных заявок для каждой основной квантовой вычислительной модальности, опубликованное основными патентными юрисдикциями.

Percentage of Published Patent Applications About Different Modalities By Location (2004-2023)



Продолжение приложения 2

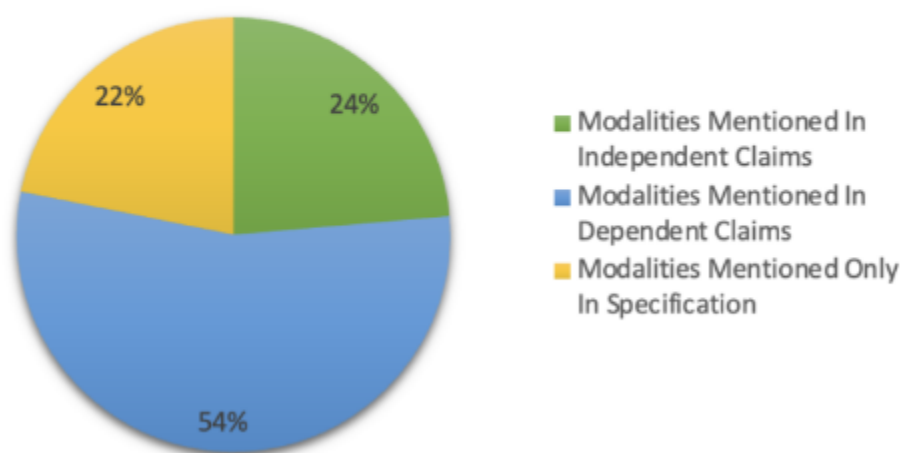
Примечательно, что хотя в Китае самое большое общее количество патентных заявок на квантовые вычисления, Соединенные Штаты лидируют по количеству патентных заявок, специфичных для каждого основного подхода к физической реализации. Это может означать, что США лидируют в области НИОКР для квантового оборудования, в то время как Китай больше фокусируется на квантовом программном обеспечении и приложениях квантовых компьютеров.

Компании из разных стран демонстрируют разный акцент на различных модальностях квантовых вычислений. Например, количество патентных публикаций в США доминирует в области фотонных и квантовых точечных технологий, тогда как китайские публикации заметно конкурентоспособны в области сверхпроводимости, захваченных ионов и топологических квантовых вычислений. Европейские патентные публикации демонстрируют более сбалансированное распределение по различным модальностям, в то время как японские заявки демонстрируют особую концентрацию на сверхпроводящих и фотонных технологиях.

В статье также рассматривается, в какой степени физическая реализация квантовых вычислений упоминается в патентных заявках. Среди патентных заявок, в которых упоминается, по крайней мере, одна модальность физической реализации, обнаружено, что 24% этих заявок включают ключевые слова, связанные, по крайней мере, с одной модальностью, в своих независимых пунктах формулы изобретения, что потенциально ограничивает сферу действия патента определенной модальностью. Между тем, **54% включают модальность в зависимые пункты формулы изобретения**, но не в независимые пункты формулы изобретения, что указывает на то, что технология может быть пригодна для различных типов квантовых вычислений, не ограничивая патент одной модальностью.

Наконец, **22%** заявок обсуждают физическую реализацию в спецификации, но исключают ее из пунктов формулы изобретения, что позволяет предположить, что эти патенты сосредоточены на областях, отличных от физической реализации квантовых компьютеров, и упоминают ее в первую очередь как справочную информацию или как возможность раскрытия информации.

Discussion of Quantum Computing Modalities



Выводы:

Скорость патентования в области квантовых вычислений растет, отражая быстрый рост сектора. Поскольку производители начинают внедрять коммерчески жизнеспособные квантовые компьютеры, которые превосходят классические аналоги и приносят существенный доход, они начнут становиться объектами патентных претензий, делая конкуренцию в сфере интеллектуальной собственности все более актуальной.

Патенты, касающиеся физической реализации квантовых компьютеров, потенциально влиятельны, они охватывают основополагающие технологии, используемые во всей промышленной цепочке, которые часто легко обнаружить и трудно проектировать вокруг них.

Тем не менее, патенты, специально нацеленные на модальности физической реализации квантовых компьютеров, составляют небольшую часть (менее 10%) всех патентов на квантовые вычисления. Объем патентных заявок на большинство модальностей по-прежнему скромен по сравнению с более устоявшимися отраслями. Эта относительно открытая область предоставляет компаниям уникальные возможности для получения широких и эффективных патентов.

Даже для изобретений, не сосредоточенных на конкретной физической реализации квантовых компьютеров, детализация аппаратных характеристик может быть выгодной. Такие раскрытия не только удовлетворяют требованиям к письменному описанию, но и предоставляют возможности для эффективного дифференцирования предшествующего уровня техники, для которого отсутствуют соответствующие раскрытия. Раскрытие того, как высокоуровневые методы или приложения могут быть адаптированы или оптимизированы для конкретных физических реализаций, становится особенно ценным в этом контексте, предлагая стратегические преимущества в подчеркивании новизны патента и позиционировании патента для потенциальных утверждений.

Патентные данные показывают разный уровень зрелости среди квантовых вычислительных модальностей. Сверхпроводящие технологии показывают опережение в два-три года по сравнению с другими ключевыми подходами, такими как фотонные технологии и технологии захваченных ионов. В то же время, новые области, такие как квантовые вычисления на основе нейтральных атомов, наблюдают рост патентной активности. В области, изобилующей неопределенностью, где будущее может благоприятствовать одной модальности или способствовать сосуществованию или интеграции нескольких, этот разнообразный патентный ландшафт становится критическим фактором в стратегическом патентном планировании.

В то время как обеспечение надежной патентной защиты в ведущей модальности имеет жизненно важное значение для успеха, инвестиции в менее защищенные области могут принести непропорционально высокую прибыль.

Данные по патентам также подчеркивают интенсивную глобальную конкуренцию в области квантовых вычислений, при этом Соединенные Штаты лидируют по количеству патентных заявок на все ключевые модальности, но часто занимают меньшую долю, чем Китай и Европа вместе взятые. Учитывая восприятие квантовых вычислений как вопроса, связанного с национальной безопасностью, компании могут столкнуться с нормативными препятствиями при выходе на определенные рынки. В ответ они могут рассмотреть лицензирование патентов как альтернативный источник дохода на недоступных рынках. В таких случаях целевые лицензиаты получают значительные рычаги, если они смогут контр- заявить о патентах на внутренних рынках конкурентов. Следовательно, для компаний может быть стратегически выгодно искать патентную защиту не только на своих операционных рынках, но и в странах происхождения своих основных конкурентов.

Автор: Автор Фанчжоу (Фред) ЦЮ

Данные в этой статье были получены с помощью пользовательских запросов в LexisNexis TotalPatent One[®] за 20 лет с 1 января 2004 г. по 31 декабря 2023 г. Обычно между подачей и публикацией патентной заявки проходит 18 месяцев. Поэтому представленные данные предлагают несколько отсроченное отражение патентных тенденций

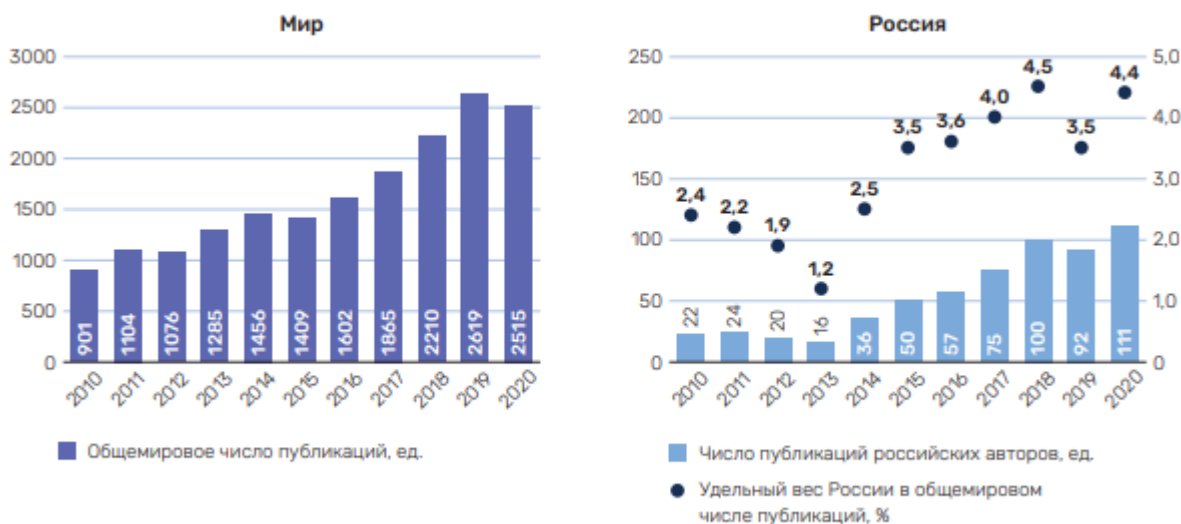
Источник:

*Patent Landscape for Quantum Computing: A Survey of Patenting Activities for Different Physical Realization Methods, 13.02.2024,
<https://ipwatchdog.com/2024/02/13/patent-landscape-quantum-computing-survey-patenting-activities-different-physical-realization-methods/id=173303>*

Публикационная и патентная активность по научному направлению «Квантовые коммуникации» в мире и России за 2010-2020 годы

Квантовые коммуникации - публикации

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности

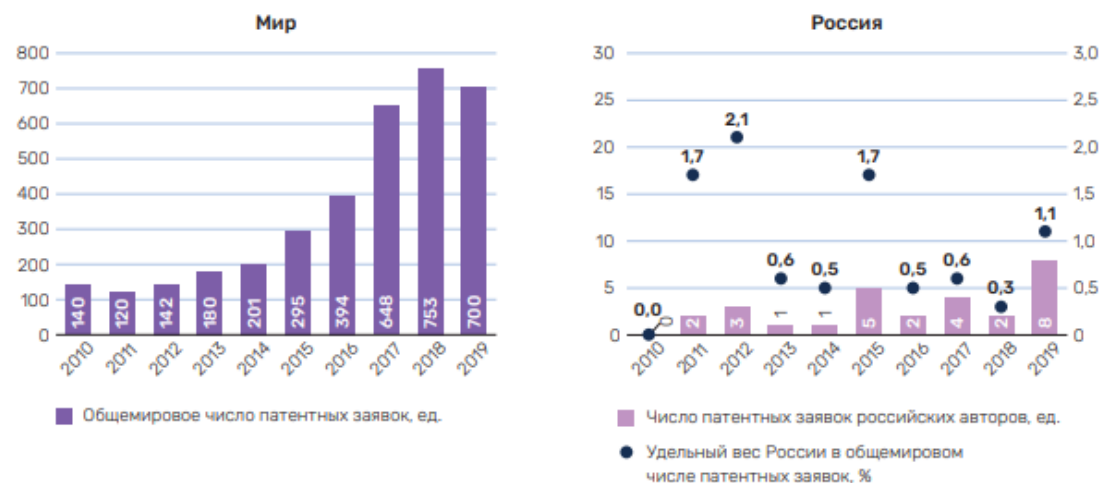


Источник: ИСИЗЗ НИУ ВШЭ.

стр. 93

Квантовые коммуникации – патенты

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЗЗ НИУ ВШЭ.

стр.94

Квантовые коммуникации – по группам технологий

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

	Научные публикации			Патентные заявки		
	Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %
Квантовые коммуникационные сети	2020	1530	81	2019	593	7
	2015	935	47	2015	228	5
	2010	678	21	2010	125	0
Недоверенные промежуточные узлы	2020	172	1	2019	19	1
	2015	66	0	2015	0	0
	2010	22	0	2010	0	0
Атмосферные и космические линии связи	2020	4	0	2019	2	1
	2015	0	0	2015	0	0
	2010	2	1	2010	0	0
Клиентские устройства квантовых коммуникаций	2020	1027	33	2019	113	0
	2015	489	4	2015	69	0
	2010	224	0	2010	18	0

Источники: ИСИЗЗ НИУ ВШЭ; ОАО «РЖД».

стр. 98

Источник: Развитие отдельных высокотехнологичных направлений, Москва, 2022, https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_opublikovalo_beluyu_knigu_vysokih_tehnologiy_v_rossii_i_za_rubezhom.html

Долгосрочный взгляд Китая на квантовые технологии заставляет США и ЕС догонять их

Отчет института изучения Китая Меркатора (MERICS)

(машинный перевод)

Соревнование между Китаем и ЕС сосредоточено на технологиях, способствующих созданию сверхпроводящих квантовых компьютеров

Квантовая связь и вычисления опираются на широкий спектр технологий, устройств и сырья. Некоторые из них были добавлены в контрольные списки двойного назначения, в частности, интегральные схемы КМОП и криогенные системы охлаждения, такие как холодильники растворения. Тем временем

Китай объявил о прорывах в холодильниках растворения, модулях микроволновой связи высокой плотности 56 и термометрах на основе оксида рутения 57 в прошлом году. Это говорит о том, что существует китайская исследовательская программа по содействию самообеспечению в цепочках поставок для сверхпроводящих квантовых компьютеров.

Напротив, **оборудование, используемое для фотонных квантовых компьютеров**, такое как специализированные лазерные системы, детекторы одиночных фотонов и синтетические алмазы, в настоящее время не находится в центре внимания – ни в китайских прорывах, ни в западных ограничениях.

У Китая также есть сильные стороны в критически важном сырье, особенно в **кремнии-28 и гольмиевой меди**. Количество этих материалов, в которых нуждаются европейские заинтересованные стороны, все еще достаточно мало, чтобы покрыть их за счет накопления. Более того, у Китая также есть свои собственные зависимости в критически важных материалах: для крионических систем охлаждения требуется **гелий-3**, который производится в России и США как побочный продукт ядерного оружия, а для сверхпроводящих магнитов требуется **ниобий**, который в основном добывается в Бразилии.

The US leads in quantum tech, but China dominates communication



TYPE OF TECHNOLOGY	 QUANTUM COMPUTING	 QUANTUM COMMUNICATION	 QUANTUM SENSING
What is it?	Computers using qubits (quantum bits) instead of traditional bits. Qubits can have multiple states at the same time, massively speeding up some calculations.	Using quantum effects for secure communication that cannot be intercepted.	Using quantum mechanics for better, more exact sensing.
Key potential applications	Breaking encryption, drug discovery	Quantum key distribution for safe communication, for instance for banks	Research in physics, for instance gravitational wave detectors; radars; optical quantum sensors for metrology and imaging, GPS
State of progress	Multiple quantum computers exist, but none are able to do all calculations	Quantum fiber-optic networks and quantum satellites exist and are being piloted for first applications	Currently in research and roll-out phases, with different types of sensors at very different technology readiness levels

Leading country/group	US leads in quantum computing, with IBM rolling out quantum computing datacenters with a 133-qubit chip in 2024, as well as a >1,000 qubit computer. China's top quantum computer has 72 qubits.	China leads in quantum communication, with a 12,000 km quantum network with two satellites. Switzerland has a metropolitan (Geneva) network. The US is piloting a network on the East Coast (between banks).	The US enjoys a narrow lead on China, but China is closer to market with some innovations. Germany plays an outsized role in quantum sensing compared to quantum computing due to its traditional strength in precision machinery.
Different approaches	Approaches differ in how they achieve qubits. Superconducting, trapped ions, photonic, neutral atoms, semiconductor quantum dots (spin-based).	Quantum key distribution (via BB84); quantum teleportation	Too many to count, as sensors are fundamentally different to each other
Other names	Quantum control	Quantum networking	Quantum metrology

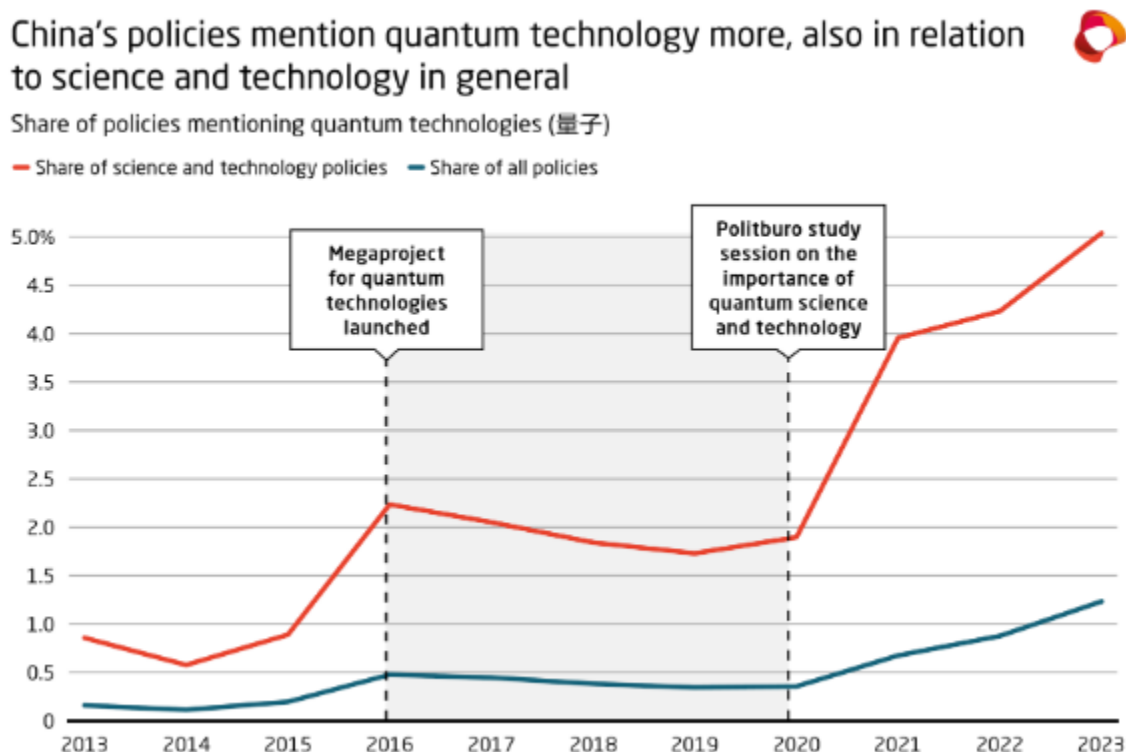
....

В то время как Китай и Европа теперь рассматривают квантовые вычисления как важнейшее условие будущего развития и оба фокусируются как на квантовых вычислениях, так и на квантовой связи, США считают квантовые вычисления гораздо более важными.

В этом отчете рассматривается прогресс Китая в квантовых вычислениях и квантовой связи, оставляя в стороне квантовое зондирование, т. е. использование квантовых эффектов для повышения чувствительности и точности датчиков, таких как часы. Это связано с тем, что, несмотря на то, что квантовое зондирование наиболее близко по готовности к военному использованию, улучшения, которые оно обеспечивает, носят количественный характер - делая зондирование более точным — вместо того, чтобы обеспечивать совершенно новые возможности.

Пекин усиливает поддержку квантовых исследований и разработок

При президенте Си Цзиньпине наука и технологии приобрели важное значение в правительственных планах высокого уровня, а квантовые технологии — в них, о чем свидетельствует График 2. На сессии Политбюро по изучению технологий в 2020 году Си назвал квантовые технологии еще одним фронтом в глобальной конкуренции в области науки и технологий.



В 2006 году новаторский план Китая по науке и технологиям на 2020 год включил «квантовый контроль» в число основных областей исследований, имея в виду усилия по манипулированию квантовыми состояниями, начиная с нескольких частиц.

После всплеска упоминаний квантовых технологий в политических документах, область исследований была повышена в 2016 году с объявлением о **мегапроекте S&T по «квантовой информации и квантовым вычислениям»**, что сделало его одним из 16 главных приоритетов S&T Китая на период **2021–2035 годов**.

Мегапроекты S&T являются основным компонентом долгосрочных планов НИОКР Китая. Каждый мегапроект содержит несколько подзадач, при этом исследователи подают заявки на финансирование 3–5-летних проектов. «Квантовая информация» заняла второе место среди передовых областей S&T, которые китайское правительство отдало приоритет в своем пятилетнем плане на 2021–2025 годы, после искусственного интеллекта, но перед полупроводниками.

Для реализации этого в 2017 году была создана **Национальная лаборатория квантовой информатики (NLQIS)**. Это помещает квантовые технологии в небольшую группу приоритетных областей исследований. В официальном списке всего шесть национальных лабораторий. Хотя в этот список не входит NLQIS, лаборатория, возглавляемая Пан Цзяньвэем, почти наверняка имеет поддержку центрального правительства. В своих заметках к учебной сессии Политбюро Пан похвалил центральное правительство за поддержку национальной лаборатории.

Пекин также усиливает поддержку внедрения квантовых технологий в промышленность.

Министерство промышленности и информационных технологий (МПИТ) опубликовало планы будущих технологий в январе 2024 года, включив квантовые компьютеры в десятку самых ожидаемых продуктов. План также призывал к будущим коммуникационным технологиям, включающим квантовую информацию, расширяя цели, изложенные в документе «Сделано в Китае 2025», плане модернизации промышленности Китая, выпущенном в 2015 году.

Флагманские проекты Китая являются секретными и дорогостоящими: строительство национальной лаборатории началось с инвестиций в размере 7 миллиардов юаней (**1 миллиард долларов США**), но публичной информации о ее годовом операционном бюджете нет, а их поддержку оказывает ряд исследовательских программ и институтов более низкого уровня.

За последние 20 лет китайские исследователи квантовой техники преуспели в получении поддержки высокого уровня из Пекина. Но их возросший авторитет также влечет за собой ограничения. Квантовая технология является частью расширенной и обновленной структуры Китая по контролю за иностранным доступом к технологиям.

Центральным элементом является **Каталог технологий, запрещенных и ограниченных к экспорту**. Технология квантового шифрования была добавлена в список ограниченных в 2020 году, что означает, что технология квантовой связи может экспортироваться только с одобрения правительства.

Технология сверхнизких температур (ниже 6 Кельвинов), необходимая для большинства сверхпроводящих квантовых компьютеров, также находится в «ограниченном» списке. Эти ограничения распространяются на исследователей. Квантовые исследователи и предприниматели успешно подчеркивают стратегическую важность своей работы для привлечения финансирования, чему способствуют научные успехи и лоббирование квантовых ученых, таких как Пан Цзяньвэй, на Всекитайском собрании народных представителей.

Однако их стратегическая важность также ограничивает их свободу взаимодействия с зарубежными коллегами. Например, паспорта «стратегических ученых» хранятся в их учреждениях и выдаются только при соблюдении строгих условий. Несмотря на то, что Пан работал в Австрии и Германии, сейчас он, как сообщается, не может выезжать за границу.

В Китае по-прежнему не хватает исследовательской коммуникации

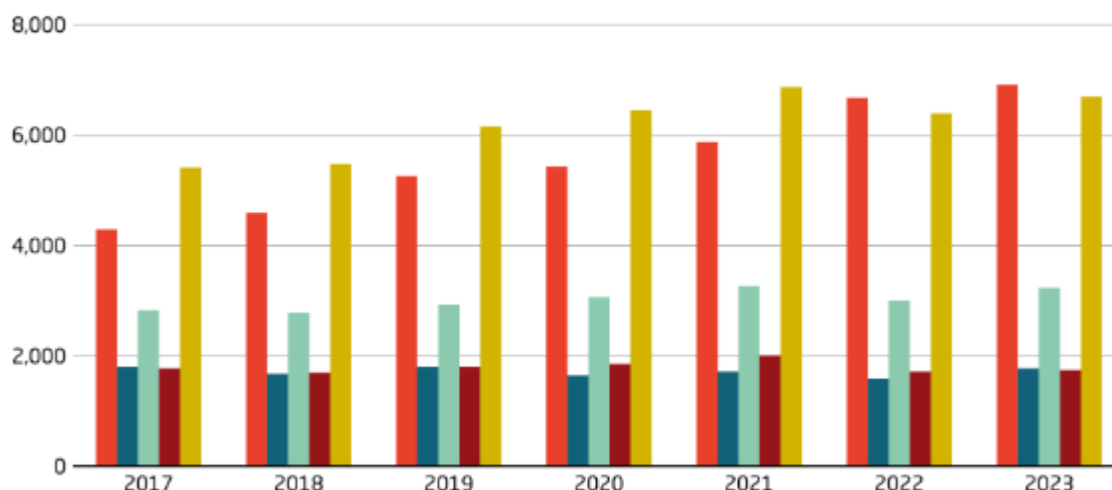
Китай теперь публикует больше квантовых статей, чем США, в основном благодаря своим исследованиям в области квантовых коммуникаций (см. график ниже).

Китай опубликовал больше высокоцитируемых статей, чем любая другая страна в период с 2019 по 2023 год. В области квантовых вычислений США по-прежнему лидируют. 20 Правительство США уделяет гораздо меньше внимания квантовым коммуникациям.

China overtakes United States in quantum tech papers

Number of academic articles by author location

China France Germany United Kingdom United States



Note: OpenAlex contains mostly English-language papers. Quantum technology is defined as quantum computing and quantum communication.

Source: MERICS analysis of OpenAlex Data

По патентам картина похожая. **Китай лидирует в мире по патентам на квантовую связь**, но отстает от США по патентам на квантовые вычисления. 22 В 2023 году Европейское патентное ведомство также обнаружило, что, хотя число патентов на квантовые вычисления в Китае растет, они по-прежнему значительно отстают от США. Это все еще, вероятно, завышает китайский объем производства, поскольку китайские ученые заинтересованы в подаче большего количества патентов, чем их международные коллеги.

По крайней мере, один немецкий квантовый исследователь сказал, что, хотя Китай добился больших успехов в разработке квантовых технологий, ключевые прорывы, как правило, не происходят из Китая. Тем не менее, китайские исследовательские группы совершили крупные прорывы, которые требуют как глубоких теоретических знаний, так и передовых инженерных навыков.

Например, Китай запустил первый квантовый спутник в мире, Micius (Mozi, 墨子), в 2016 году, достижение, сравнимое с первым в мире спутником, российским «Спутником».

Государственные расходы Китая на квантовые технологии в четыре раза выше, чем в США, и на Китай приходится более половины предполагаемых мировых государственных инвестиций в квантовые технологии. Это справедливо как для науки, так и для внедрения. Частные технологические компании, такие как Alibaba и Baidu, свернули свои команды квантовых вычислений в 2023 году.

.....

На самом деле Пекин поощряет квантовых предпринимателей с помощью отраслевых программ и платформ. Например, последний квантовый компьютер Origin Quantum был включен в национальную сеть суперкомпьютеров Китая в апреле 2024 года.

Однако общий подход ограничивает частные компании политикой и дорожными картами, которые сформулировало государство, не оставляя иного выбора, кроме как сотрудничать с государственными учреждениями, будь то государственные предприятия или исследовательские лаборатории.

Китай находится на пути к первому внедрению технологии квантовой связи

Успех Китая в квантовой коммуникации показывает, как Пекин объединяет исследователей и государственную промышленность для разработки технологии со стратегическими и безопасными последствиями. Строительство национальной сети квантовой безопасной коммуникации является как передовым мегапроектом для китайских ученых, получивших образование на Западе, так и инфраструктурным проектом, в котором участвуют государственные предприятия с прочными связями с китайским аппаратом безопасности.

Государственные инвестиции в квантовую безопасную связь стимулировали развитие отрасли. Группа под руководством Пан Цзяньвэя и других исследователей из Китайского университета науки и технологий (USTC) в Хэфэе **построила первую квантовую связь в 2004 году**, которая использовала запутанные фотоны для отправки ключа шифрования на расстояние более 125 километров из Пекина в Тяньцзинь в процессе, называемом квантовым распределением ключей (QKD). Этот метод отправки зашифрованной информации принципиально не поддается взлому без оповещения исходного отправителя и получателя сообщения, даже квантовыми компьютерами. Таким образом, квантовое распределение ключей очень привлекательно для банков и других организаций, которые полагаются на защищенную связь. Успех USTC привел к крупному государственному проекту по созданию **национальной магистральной сети для квантовой защищенной связи**, связывающей такие крупные города, как Пекин, Шанхай и Гуанчжоу.

Продолжение приложения 4

Проект, первая фаза которого была завершена **в 2020 году**, позволил исследователям USTC коммерциализировать свою технологию и основать фирму QuantumCTek (она же Guodun Quantum 国盾量子) в 2009 году.

QuantumCTek предоставляет основное оборудование QKD, объясняет Чан Инъюн, ее генеральный директор, после чего системный интегратор строит связь, привлекая широкий круг поставщиков, включая оптоволоконные кабели и классическое коммуникационное оборудование. Вся магистральная сеть теперь имеет протяженность **12 000 километров**, и несколько прибрежных городов также создали локальные сети. Это намного больше, чем что-либо в Европе или США, где ведущими проектами являются столичная сеть вокруг Женевы и пилотная сеть между банками на Восточном побережье.

QuantumCTek полагается на клиентов и партнеров из государственного сектора, включая китайских оборонных подрядчиков, таких как China Electronics Technology Corporation (CETC). Хотя компания никогда не получала прибыли, она успешно вышла на Шанхайскую фондовую биржу в 2020 году, чему способствовали ожидания государственных закупок продукции QuantumCTek.

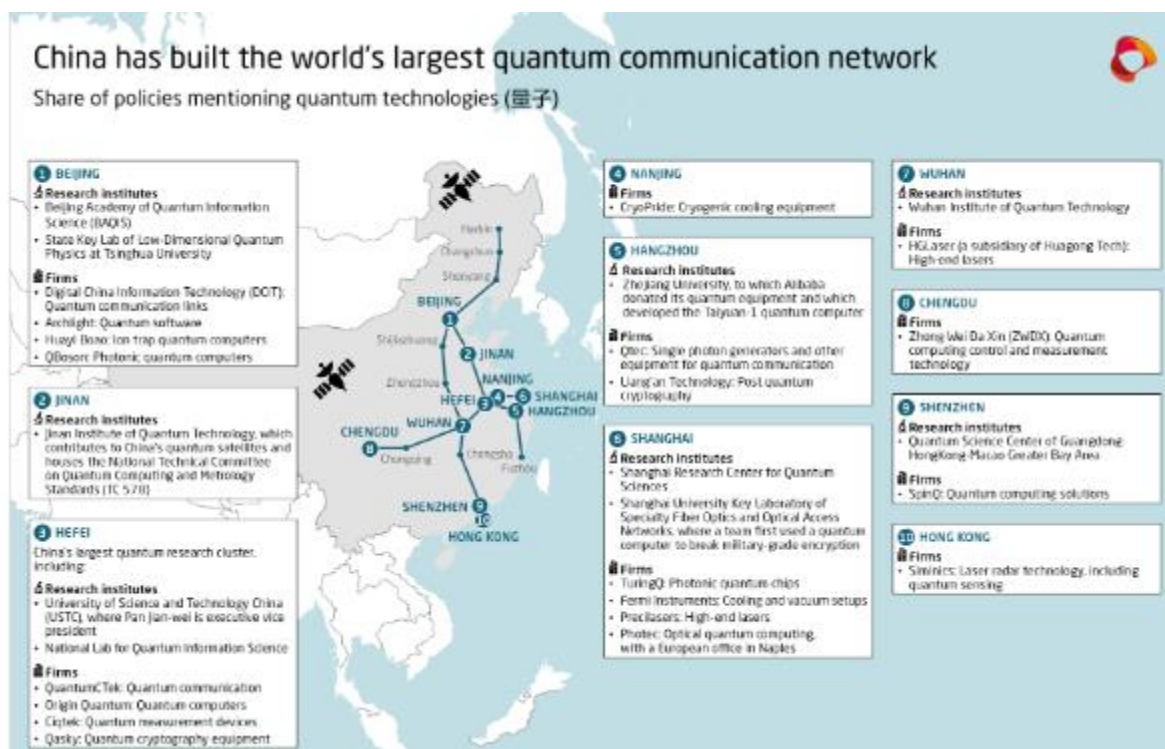
В марте 2024 года China Telecom, одна из трех государственных телекоммуникационных компаний Китая, приобрела 23 процента акций компании и 41 процент голосующих акций. 35 СМИ ожидают слияния, указывая на стимулы для государственных предприятий (ГП) поддерживать будущие отрасли и естественное соответствие телекоммуникационной компании, предлагающей защищенную связь.

В 2021 году QuantumCTek была добавлена в список предприятий США, который запрещает ей закупать продукцию из США.

Квантовые спутники Китая

Создание наземной сети для квантовой защищенной связи стало отраслью, которая ставит новые задачи перед учеными, такими как Пань Цзяньвэй. К ним относятся покрытие больших расстояний квантовыми спутниками.

Micius, квантовый спутник, был запущен в 2016 году для обеспечения первой в мире квантово-шифрованной связи между континентами, разработанной командой из USTC и Венского университета. В рамках мегапроекта S&T в области квантовых вычислений и связи второй спутник, Jnan-1, был выведен на низкую околоземную орбиту в июле 2022 года. Этот микроспутник весит одну шестую часть Micius, но имеет на 2-3 порядка большую точность квантовой связи. Китай планирует запустить третий квантовый спутник к 2026 году. Этот спутник должен достичь больших высот, что требует более мощных лазеров и более высокой точности.



Sources: Chinese Academy of Sciences Quantum Network Company (Quantumnet), Chinese Academy of ICT (CAICT), MERICS

Интеграция квантовых спутников Китая и магистральной сети является примером усилий Китая по созданию интегрированной информационной сети «космос-земля». Такая всеобъемлющая, безопасная, надежная и глобальная цифровая сеть, охватывающая море, сушу, воздух и космос, является долгосрочной целью Коммунистической партии Китая (КПК) с очевидными военными и связанными с безопасностью последствиями.

Китай может открыть свою квантовую сеть для международных партнеров. Китай и Россия испытали квантовую спутниковую связь **в декабре 2023 года**. СМИ предполагают, что это может быть распространено на страны БРИКС после глобальной рекламы BeiDou, китайской альтернативы американской спутниковой навигационной системе GPS.

Появление квантовых спутников позволяет наземным сетям сосредоточиться на относительно коротких расстояниях между городами.

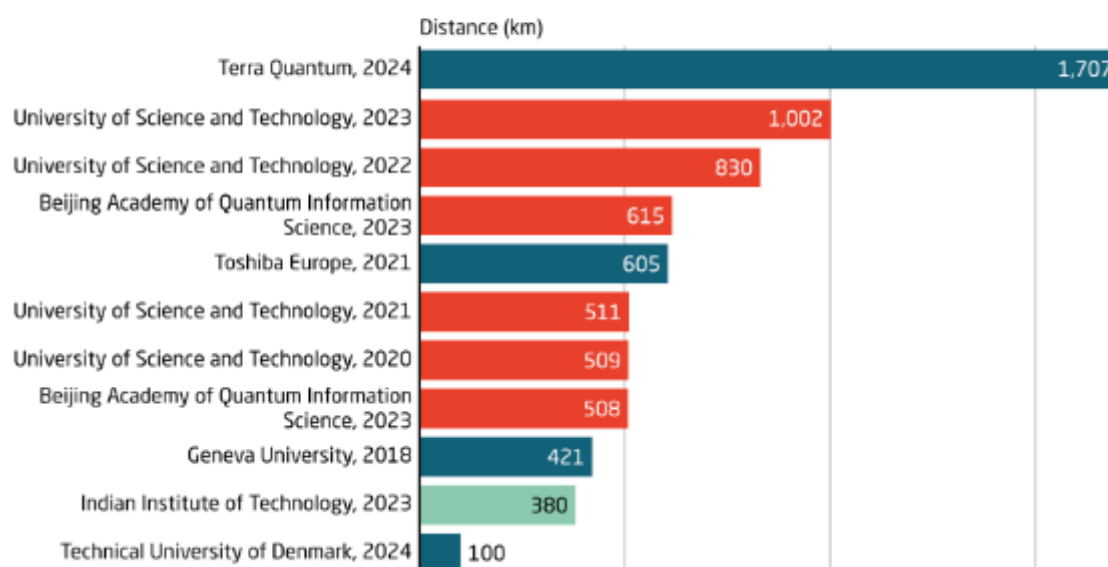
Квантовое распределение ключей наиболее безопасно, если оно бесперебойно. В то время как наземные сигналы нуждаются в станциях усиления, воздушные сигналы не нуждаются в этом, что делает квантовые спутники гораздо более подходящими для больших расстояний. В результате китайские исследователи, работающие над наземными сетями, отдают приоритет полосе пропускания и стабильности сигнала на расстояниях 300–500 километров, а не на увеличивающихся расстояниях. Хотя исследователи USTC несколько раз побили мировой рекорд на большие расстояния для наземного QKD, в настоящее время этот рекорд принадлежит швейцарской фирме Terra Quantum, которая в августе 2024 года подписала контракт с BBC США на разработку квантовой коммуникационной сети в Америке.

China and Europe lead in long-distance quantum key distribution technology



Largest distance of successful key distribution, by experiment

■ Europe ■ China ■ India



Note: Experiments differ not only in distance, but also in the length of key that can be transmitted.

Китай и Европа лидируют в распределении квантовых ключей на большие расстояния

США и Европа отстают

Многие американские наблюдатели утверждают, что Китай уже лидирует в области квантовой связи. К ним относится Национальный консультативный комитет по квантовой инициативе США (NQIAC), который призывает к увеличению инвестиций «для сохранения и расширения лидерства США во всех квантовых технологиях». 43 Акцент на квантовых компьютерах вместо квантовой связи отражает интересы частного капитала, который стимулирует инновации в США. 44 Как инфраструктурный проект, квантовая связь требует государственной и военной поддержки, импульс для которой только недавно начал набирать обороты. Например, в сентябре 2024 года Boeing объявила, что работает над квантовым спутником.

В Европе не хватает инфраструктуры и развертывания, хотя европейский лауреат Нобелевской премии Антон Цайлингер заложил основу для этой технологии. Инициатива Европейской квантовой инфраструктуры связи (EuroQCI) надеется изменить это, но была запущена только в прошлом году.

Поскольку Европа сильна в фундаментальных исследованиях, но слаба в их внедрении, а США не уделяют особого внимания большинству технологий квантовой связи, Китай с его передовыми разработками и будущей промышленной политикой намерен доминировать в этой области.

Китай и Европа быстро распутывают отношения

Китайские квантовые исследователи и предприниматели гораздо более интегрированы с Западом, чем ядерные физики в 1960-х, 1970-х и 1980-х годах. В то же время правительства по всем сторонам теперь все больше препятствуют обмену знаниями.

Эксперты, которые присутствовали на круглом столе MERICS с примерно 20 европейскими квантовыми исследователями летом 2024 года, заявили, что оценка прогресса Китая затруднена трудностями академического обмена,

отсутствием инвестиционных связей и растущей непрозрачностью политической системы Китая. Некоторые называли квантовое развитие Китая «черным ящиком». И Китай, и Европа ограничивают экспорт некоторых квантовых технологий, а Китай дополнительно стремится исключить любые иностранные компании из своих цепочек поставок.

Европа и Китай имеют давние связи в области исследований в квантовой области

Квантовый скачок Китая был совершен в Европе. Пан Цзяньвэй, который сыграл столь важную роль в развитии квантовой коммуникации и вычислений в

Китае, получил докторскую степень в 2003 году в Венском университете, где он работал с **будущим лауреатом Нобелевской премии Антоном Цайлингером**. После окончания постдокторантуры в Гейдельберге Пан вернулся в Китай в 2008 году. Воодушевленные поиском внешнего финансирования исследований, многие ведущие европейские институты организовали совместные проекты с Паном и другими китайскими учеными, а некоторые исследователи даже заняли второстепенные должности в Китае.

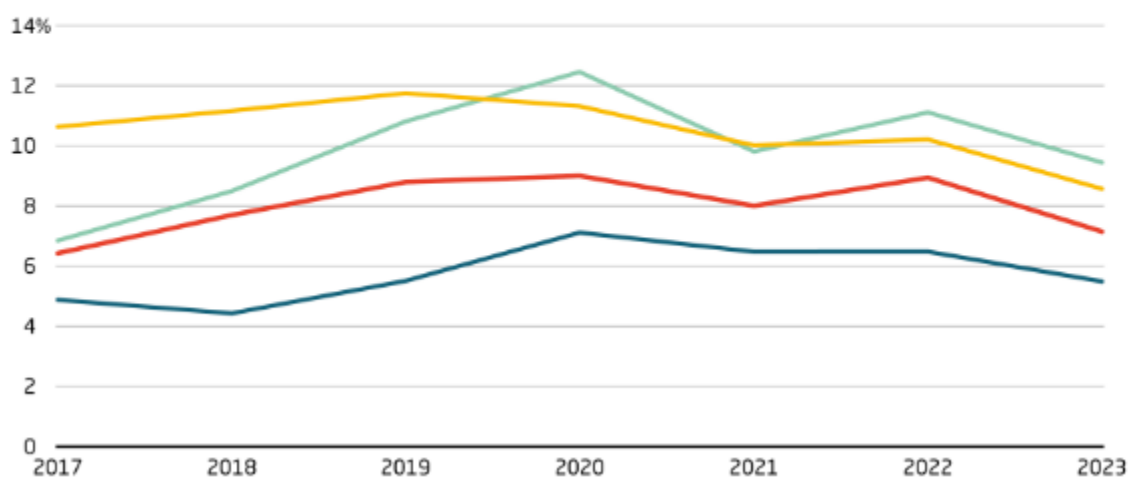
Напротив, сотрудничество с Китаем в области квантовых технологий стало предметом серьезных споров с 2018 года, когда США начали намекать, что квантовая отрасль может подвергнуться такому же пристальному вниманию, как и полупроводниковая промышленность. Европейская комиссия начала расследование утечек квантовых технологий в Китай в 2023 году. Эти оговорки также отражены в совместных работах.

Хотя доля работ, написанных в соавторстве с Китаем, увеличилась для всех европейских стран, исследованных с 2017 года, она снижается с 2020 года (см. график).

Quantum research between China and the West is declining

Share of quantum publications with co-authors from China, by country

— Germany — France — United Kingdom — United States



Source: MERICS analysis of OpenAlex Data

Институт изучения Китая Меркатора (MERICS) был основан в 2013 году Фондом Меркатора для расширения знаний и дискуссий о Китае в Германии и Европе. MERICS, в котором работают около 20 штатных международных исследователей из Европы, США и Австралии, в настоящее время является крупнейшим европейским исследовательским институтом, специализирующимся исключительно на анализе современного Китая и его отношений с Европой и остальным миром

Источник:

China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up, 14.12.2024, <https://merics.org/en/report/chinas-long-view-quantum-tech-has-us-and-eu-playing-catch>

Топ-10 перспективных технологий квантовой связи, июль 2024

ИСИЭЗ НИУ ВШЭ

Квантовые коммуникации - принципиально новый физический подход к обеспечению конфиденциальности и целостности данных и одно из самых перспективных направлений развития телекоммуникационной отрасли.

К 2032 г. глобальный спрос на технологии квантовой связи, которые уже стремительно завоевывают рынок, может превысить **8 млрд долл.** (прирост почти в 10 раз за десятилетие). Своевременный переход на квантово-устойчивые решения для защиты критической инфраструктуры становится приоритетной задачей информационной безопасности для государства и бизнеса, и значимость ее все более усиливается на фоне перспектив появления квантовых компьютеров, которые сделают уязвимыми традиционные методы криптографии. Однако массовому внедрению технологий квантовых коммуникаций пока препятствует высокая стоимость развертывания квантовых сетей и ряд физических и технических ограничений их реализации, необходимость преодоления которых намечает отдельные направления разработок (табл. 1).

Квантовый интернет (№ 1 в рейтинге) является наиболее ожидаемой технологией квантово-защищенной связи. Развертывание единой квантовой сети позволит связать квантовые процессоры и различные устройства и сенсоры (например, удаленные атомные часы или телескопы), обеспечив высочайшую точность синхронизации операций. Фундаментом для реализации квантового интернета является **квантовая телепортация** - процесс передачи квантового состояния физического объекта на идентичный объект, находящийся в другом месте, без прямого переноса квантовой частицы.

Таблица 1. Топ-10 наиболее перспективных технологий и решений квантовой связи

Ранг	Технологии и решения	Индекс значимости	Уровень готовности технологии
1	Квантовый интернет	1.00	
2	Квантовое распределение ключей	0.53	
3	Квантовый банкинг	0.27	
4	Дальнодействующая квантовая связь	0.19	
5	Квантовая память	0.14	
6	Квантовый спутник	0.14	
7	Квантовый повторитель	0.13	
8	Оптоволоконные квантовые коммуникации	0.12	
9	Многоузловые квантовые сети	0.11	
10	Гибридные квантовые сети	0.08	

Легенда:



Исследования и разработки



Прототип



Готовый продукт

Индекс значимости технологии показывает ее относительную встречаемость в проанализированном массиве источников (более 1.3 тыс. англоязычных профессиональных СМИ за 2019–2023 гг.), где 1 соответствует максимальному числу упоминаний. При расчете учитываются частота встречаемости термина, его специфичность и векторная центральность. Частота встречаемости сама по себе недостаточна для отражения реальной актуальности термина, важно, чтобы он обозначал конкретное научно-технологическое направление и не был слишком общим (эту задачу решает показатель специфичности), а векторная центральность отражает степень его связи с другими направлениями поиска. При этом высокий спрос и интерес к технологии не связаны с уровнем ее готовности к массовому распространению. *Уровень готовности* технологии показывает, на какой стадии жизненного цикла находится технология в настоящий момент.

<https://issek.hse.ru/news/943640993.html>

Первый экспериментальный прототип квантового интернета уже создан в китайской столице: в 2023 г. с помощью развернутого квантового канала связи протяженностью 64 км продемонстрировали рекордную скорость передачи данных (7,1 кубитов¹ в секунду). Достигнутая скорость квантовой телепортации пока недостаточна для развертывания полномасштабного квантового интернета. И в обозримом будущем он вряд ли заменит действующую Всемирную сеть, а, наиболее вероятно, будет использоваться в качестве сопутствующей технологии гибридной вычислительной экосистемы для решения специализированных задач в отдельных отраслях — государственном управлении, финансовом секторе, на транспорте и др. В долгосрочной перспективе создание квантового интернета приведет к смене парадигмы безопасности глобальных коммуникаций и предваряет появление универсальных квантовых компьютеров.

Высокий интерес банковского сектора к защите финансовых транзакций между странами привел к появлению концепции квантового банкинга, или квантовой финансовой системы (№ 3), основанной на технологии блокчейна и квантовых вычислений. Одним из ее компонентов станут квантовые деньги — новая децентрализованная форма цифровой валюты, защищенная от подделки квантовой криптографией. Но для полноценного развертывания квантовой финансовой системы необходимо создание отказоустойчивого квантового компьютера. По ряду оценок, это может произойти к 2035 г.

Квантовое распределение ключей

Самым зрелым и технологически развитым направлением квантовых коммуникаций является квантовое распределение ключей (№ 2). Реализованные на данный момент в системах квантовых коммуникаций решения представляют собой аппаратный комплекс передачи данных с гибридной квантово-классической защитой телекоммуникационной сети и обеспечивают только безопасную передачу ключа по открытому каналу связи между абонентами, а сама пересылаемая информация пока защищается классическими методами и по-прежнему может быть уязвима в случае потенциальных атак квантовых компьютеров. Высокая стоимость и низкая совместимость с существующей сетевой инфраструктурой сдерживают широкое внедрение данной технологии. Ее использование в настоящее время наиболее целесообразно в организациях, работающих в критически важных областях.

Большинство текущих решений и протоколов позволяют обмениваться информацией только двум сторонам, что также ограничивает практическую применимость квантового распределения ключей. В этой связи становится актуальным создание **многоузловых квантовых сетей (№ 9)**, поддерживающих одновременно связь между большим числом абонентов. В 2018 г. в Австрии создали квантовую сеть, имеющую полностью связанную архитектуру, в которой один источник запутанных фотонов распределяет квантовые состояния между многими пользователями, минимизируя нагрузку на вычислительные ресурсы

каждого из них. При этом сеть можно легко масштабировать на значительное число абонентов без снижения уровня безопасности. Экспериментальный прототип самой передовой многоузловой квантовой сети из трех узлов в 2023 г. разработан в Китае на территории города Хэфэй.

- По принципу физической реализации квантовые коммуникации делятся на оптоволоконные (№ 8) (наземный канал связи),
 - разворачиваемые с помощью квантового спутника (№ 6) (атмосферный канал связи)
 - гибридные (№ 10) (сочетающие атмосферный и наземный каналы).
- Современные системы квантового распределения ключей разрабатываются в основном на базе оптоволоконных линий связи с прямым соединением, связывающим только двух абонентов, и имеют физические ограничения дальности передачи квантовой информации (всего несколько сотен километров). Для решения этой проблемы в различных точках сети создается несколько узлов в доверенной среде (т. е. в пространстве с гарантированным уровнем безопасности), что делает их реализацию весьма дорогостоящей.

Снятие ограничений по протяженности — ключевое условие для создания **дальнодействующей квантовой связи (№ 4)**. Для поддержания на больших расстояниях высокоскоростной наземной квантовой связи разрабатываются специальные устройства — **квантовые повторители (ретрансляторы) (№ 7)**. Именно от их действенности во многом зависит успех создания квантового интернета. Первый прототип полноценного повторителя эффективностью более 80% создали в 2021 г. в Китае. Двумя годами позже в Австрии разработали еще один прототип квантового повторителя на основе ионов в ловушке, который обеспечивает передачу квантовой информации на расстояние более 800 км.

Для эффективной работы повторителей квантовых сигналов необходима **квантовая память (№ 5)** — устройство, способное сохранять квантовое состояние световых частиц в течение продолжительного времени. Существует

множество различных подходов к реализации квантовой памяти, основанных на разных физических системах (сверхпроводники, атомы, ионы, молекулы, кристаллы и др.). Однако многие из созданных прототипов обладают низкой скоростью работы и плохо совместимы с существующими системами квантовой связи. В 2023 г. в мире был создан прототип квантовой памяти на ионах в ловушке, обладающий рекордным временем хранения квантовых состояний (около 10 сек). Позже представили квантовую память на основе атомов, которая может подойти для массового производства и использования.

Увеличить дальность передачи квантовой информации, помимо квантовых повторителей, могут **квантовые спутники (№ 6)** на низких околоземных орбитах. Они позволяют передавать зашифрованные сообщения на наземные станции, при этом на значительно бóльшие расстояния между сторонами коммуникации по сравнению с наземным способом квантовой связи. Подобная система создана только в Китае на базе спутников «Мо-цзы» (Mozi, 2016) и «Цзинань-1» (Jinan 1, 2022). Однако китайские устройства до сих пор имеют серьезное техническое ограничение — низкую скорость генерации ключей. Кроме того, спутник «Мо-цзы» пока работает лишь в ночное время.

Резюме

Квантовые технологии формируют новый ландшафт передачи и защиты данных. Прежде чем описанные в настоящем обзоре решения кардинально изменят сферу коммуникаций и принципы информационной безопасности, ученым предстоит преодолеть ряд физических и технических ограничений, сдерживающих по отдельным направлениям развитие данного кластера технологий. Так, серьезным препятствием в реализации значимых для квантово-защищенной связи решений на базе квантового распределения ключей являются малая дальность передачи, низкая скорость, небольшое число взаимодействующих пользователей. Возможные сценарии преодоления такого рода сложностей предполагают, например: создание квантовых повторителей и памяти для обеспечения большей

дальности наземных сетей, разработку квантового спутника для формирования атмосферного канала передачи информации и реализацию принципа квантовой телепортации для запуска самого амбициозного проекта квантовой связи — квантового интернета.

Источники: расчеты на основе системы интеллектуального анализа больших данных iFORA (правообладатель — ИСИЭЗ НИУ ВШЭ); результаты проекта «Экспертно-аналитическое сопровождение деятельности по развитию высокотехнологичных направлений в 2024 г., включая подготовку ежегодного доклада (“белой книги”) о развитии отдельных высокотехнологичных направлений» тематического плана научно-исследовательских работ, предусмотренных Государственным заданием НИУ ВШЭ.

<https://issek.hse.ru/news/943640993.html>

Summary of NATO Quantum Strategy

17.01.2024

Краткое изложение квантовой стратегии НАТО

(машинный перевод)

1. Недавние достижения в области квантовых технологий приближают нас к глубокому сдвигу в науке и технике, который будет иметь далеко идущие последствия для нашей экономики, безопасности и обороны. Эти технологии могут произвести революцию в зондировании; визуализации; точном позиционировании, навигации и синхронизации; коммуникациях; вычислениях; моделировании; имитации; и информационной науке.

Квантовые технологии имеют потенциально революционные и разрушительные последствия, которые могут ухудшить способность Альянса сдерживать и защищать. Таким образом, квантовые технологии являются элементом **стратегической конкуренции.**

2. Квантовые технологии обладают потенциалом предложить возможности в области вычислений, коммуникаций и ситуационной осведомленности, которые не имеют себе равных в технологиях, доступных в настоящее время Альянсу, и которые могут составить значительное стратегическое преимущество. Однако квантовые технологии могут в равной степени дать возможность нашим стратегическим конкурентам и потенциальным противникам.

Стратегическое видение: Альянс, готовый к квантовым технологиям

3. Чтобы стать готовым к квантовым технологиям альянсом, НАТО и союзники будут способствовать развитию безопасной, устойчивой и конкурентоспособной **квантовой экосистемы**, способной реагировать на быстрый темп технологической конкуренции в квантовой отрасли.

Это требует согласованности в инвестициях, сотрудничества между союзниками в возможностях развития технологий, развития и защиты квалифицированной рабочей силы, а также повышения ситуационной осведомленности и **обмена информацией**. Это также потребует разработки и внедрения критически важных технологий, необходимых для квантовых технологий. Не менее важно сдерживать и защищать наши собственные системы и сети от квантовых и других атак.

4. Для достижения стратегической цели стать Альянсом, готовым к квантовым технологиям, НАТО и союзники будут использовать квантовые технологии для поддержки основных задач Альянса, стремясь к следующим желаемым результатам:

- Союзники и НАТО определили наиболее перспективные военные и двойные квантовые приложения, эксперименты и интеграцию квантовых технологий, которые отвечают требованиям оборонного планирования и развития потенциала;
- НАТО разработала, приняла и внедрила **структуры, политику и стандарты**, как для программного, так и для аппаратного обеспечения с целью повышения оперативной совместимости;
- Союзники сотрудничают в разработке квантовых технологий с целью поддержания технологического превосходства НАТО и возможностей союзников в этой области;
- НАТО выявило, поняло и извлекло выгоду из развивающихся достижений квантовых технологий, в том числе с помощью вспомогательных технологий и в конвергенции с другими EDT;
- У НАТО есть **Трансатлантическое квантовое сообщество** для стратегического взаимодействия с правительством, промышленностью и научными кругами во всех наших инновационных экосистемах;

• НАТО перевело свои криптографические системы на квантово-безопасную криптографию;

• Соответствующие квантовые стратегии, политики и планы действий динамически обновляются и выполняются; и

• Союзники осознали и принимают меры по добровольному *предотвращению враждебных инвестиций и вмешательства в наши квантовые экосистемы*, что может включать в себя проверку соответствующих цепочек поставок на национальном уровне.

5. Кроме того, НАТО станет ведущим трансатлантическим форумом по квантовым технологиям в сфере обороны и безопасности, помогая постоянно развивать наше общее понимание и использовать потенциал квантовых технологий, одновременно защищая от их враждебного использования.

Создание альянса, готового к квантовым технологиям

6. Союзники и НАТО должны срочно **ускорить разработку квантовых технологий**, которые могут расширить наши возможности, а также предотвратить образование новых пробелов в возможностях в мире, где конкуренты-равные сами внедряют квантовые технологии. Учитывая двойную природу квантовых технологий, это преимущество может быть достигнуто только в тесном сотрудничестве с квантовыми экосистемами союзников. Союзники и НАТО должны принять подход **«обучение на практике»** для интеграции соображений квантовых технологий в реализацию наших оперативных концепций, циклов планирования обороны, циклов разработки возможностей и усилий по стандартизации.

7. По мере того, как DIANA и Инновационный фонд НАТО (NIF) начнут функционировать в полную силу, их деятельность в области глубоких технологий также будет способствовать формированию стратегического подхода НАТО к квантовым технологиям и укреплению взаимодействия НАТО с квантовой экосистемой союзников.

8. **Конвергенция квантовых технологий** и других EDT влечет за собой важные последствия для обороны и безопасности, а также потенциальные военные приложения и возможности. Примерами служат **использование квантовых датчиков для улучшения сбора данных в космосе и обеспечения возможностей позиционирования, навигации и синхронизации без необходимости полагаться на глобальные навигационные спутниковые системы.**

9. НАТО признает, что одним из важнейших ресурсов в достижении квантового преимущества является **талант, который станет важнейшим фактором**, определяющим будущую траекторию Альянса в этой области. По мере того, как квантовые технологии набирают обороты, будет расти и спрос на экспертов с высшим образованием в этой области.

Ответственные инновации

10. Хотя квантовые технологии имеют менее очевидные этические последствия по сравнению с другими EDT, такими как ИИ, автономность или биотехнологии и улучшение человека, союзники и НАТО, тем не менее, привержены внедрению ответственного подхода к инновациям в области квантовых технологий. Это будет охватывать три основные области: связи с конфиденциальностью данных, ожидание развития международных норм и соображения устойчивости.

11. Комитеты НАТО также будут служить платформами для обмена и согласования взглядов союзников на растущие нормы, связанные с квантовой безопасностью, по мере их развития. Союзники будут обмениваться взглядами в НАТО в соответствии с этой Стратегией и в свете других международных форумов.

12. Для комплексного анализа рисков и возможностей в области квантовых технологий Совет по обзору данных и искусственного интеллекта (DARB) может предложить свои рекомендации относительно последствий развития данных и искусственного интеллекта для квантовых технологий.

Трансатлантическое квантовое сообщество

13. Альянс, готовый к квантовым технологиям, требует, прежде всего, более тесного сотрудничества между союзниками и устойчивой квантовой экосистемы, которая выходит за рамки наличия соответствующего финансирования. Успешное масштабирование и внедрение квантовых технологий также зависит от наличия поддерживающих технологий и эффективных связей между новыми исследовательскими прорывами и инженерными методами. Квантовые технологии особенно зависят от поддерживающих технологий. Например, квантовые компьютеры требуют точных метрологических инструментов, надежных производственных возможностей специализированного производства и криогеники.

14. Конечные пользователи и лидеры оборонной промышленности играют решающую роль в переводе перспективных вариантов использования квантовых технологий в возможности масштабирования. НАТО занимает уникальное положение для посредничества в возможностях, которые стали возможны благодаря EDT с промышленностью, правительствами и конечными пользователями. Быстрые темпы развития квантовых технологий требуют согласованного подхода к этому типу координации и согласования среди союзников, что будет обеспечено созданием Трансатлантического квантового сообщества.

Защита Альянса от квантовой угрозы

15. Квантовые технологии оказывают двоякое влияние на кибербезопасность и оборону, принося пользу как оборонительной, так и наступательной стороне.

При полном внедрении функциональные квантовые технологии позволят частным и государственным субъектам Альянса лучше защищать свои данные и коммуникации быстрым и надежным способом. Альянс, готовый к квантовым технологиям, сможет лучше обнаруживать и блокировать потенциальные вторжения в киберпространство.

16. Функциональный квантовый компьютер также сможет взламывать существующие криптографические протоколы.

17. Сегодня постквантовая криптография является важным подходом к защите коммуникаций от атак с использованием квантовых технологий. В будущем дальнейшие усовершенствования могут позволить квантовому распределению ключей также способствовать обеспечению безопасности коммуникаций.

18. Через комитеты и органы НАТО союзники могут поддерживать друг друга и предприятие НАТО в разработке и внедрении постквантовой криптографии и квантового распределения ключей для повышения квантовой устойчивости наших сетей. НАТО продолжит поддерживать исследования по переходу к квантово-безопасным коммуникациям в воздушном, космическом, киберпространстве, на суше и на море.

19. Стратегические конкуренты и потенциальные противники могут также использовать возможности дезинформации в обществах союзников, создавая общественное недоверие к военному использованию квантовых технологий. Союзники будут стремиться предотвращать и противодействовать любым таким усилиям с помощью стратегических коммуникаций. НАТО будет оказывать поддержку союзникам по мере необходимости.

Источник:

Summary of NATO Quantum Strategy, 17.01.2024,
https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm