

ФОРУМ
БУДУЩИХ
ТЕХНОЛОГИЙ

РОСКОНГРЕСС
Пространство доверия

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

При поддержке



Минцифры
России



РКЦ | Российский
Квантовый
Центр

Организатор
научной конференции

Соорганизатор



ОАО «РЖД»

Соорганизатор



Титульный партнер



Титульный партнер



ПРАВИТЕЛЬСТВО
МОСКВЫ

Генеральный партнер



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВТОРАЯ КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ.....	3
КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ И КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ	7
КВАНТОВАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ.....	10
КВАНТОВАЯ МЕТРОЛОГИЯ И СЕНСОРЫ.....	13
ДРАЙВЕРЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РФ	15
КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГОРОДСКАЯ СРЕДА	22
ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	28

« Мир на квантовом уровне значительно отличается от привычного окружающего нас мира. Там работают другие физические законы, и люди учатся их использовать. Сверхидея квантовых технологий в том, чтобы решить задачи, которые человечество не просто не решило, но ещё даже не сформулировало. Считается, что квантовый компьютер, манипулируя отдельными квантовыми объектами, лучше справится с созданием новых материалов и новых лекарств. Он сможет взломать системы современного шифрования, но в то же время квантовая криптография защитит информацию на фундаментальном уровне. Ждут появления полноценного квантового компьютера финансисты и климатологи, инженеры и учёные. Квантовые технологии названы среди важнейших приоритетов технологического суверенитета России, и мы поставили перед собой амбициозную цель войти в число мировых лидеров по их разработке».

Юнусов Руслан Рауфович, сооснователь Российского квантового центра, советник генерального директора госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачёва

« Работа над этим отчётом помогла не только зафиксировать текущий статус развития квантовых технологий, но и увидеть основные направления для будущих применений. Квантовые технологии стремительно движутся в сторону полезных применений. Квантовые решения «сегодняшнего дня» — это средства обеспечения защиты информации, квантовое распределение ключей и постквантовая криптография. Оба инструмента гарантируют возможность защититься не только от существующих угроз, но и от будущих атак. Сегодня такие технологии активно тестируются, например, банками. Уже сейчас реализуются пилотные проекты в области квантовых вычислений, и в масштабе 3–5 лет мы ожидаем решения с их использованием практически важных задач. Мы переходим в новый период времени — эру применения квантовых технологий».

Фёдоров Алексей Константинович, руководитель научной группы Российского квантового центра и направления «Квантовые алгоритмы и программное обеспечение» дорожной карты по развитию квантовых вычислений, профессор МФТИ

« Москва — ведущий центр внедрения и разработки инновационных решений в сфере квантовых технологий. В столице сосредоточены научные центры и предприятия, которые выполняют роль локомотива в развитии этой индустрии. За последние годы в городе был запущен ряд научно-технологических акселераторов и успешно реализовано множество пилотных проектов как с коммерческими компаниями, так и с государственным сектором, активно функционируют институты развития. Становление квантовых технологий открывает столице новые горизонты в различных отраслях экономики: в автомобильной, фармацевтической и медицинской промышленности, авиа- и ракетостроении, микроэлектронике, биохимии и информационных технологиях. Их внедрение в городскую среду открывает возможность реализовать концепцию «Квантового города будущего».

Овчинский Владислав Анатольевич, руководитель Департамента инвестиционной и промышленной политики города Москвы

ВТОРАЯ КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Мы привыкли, что год от года компьютеры становятся всё мощнее и могут решать всё более сложные задачи. Это связано с тем, что технологии изготовления транзисторов на полупроводниковых кристаллах продолжают совершенствоваться, поддерживая технический прогресс в сфере компьютерных вычислений. Однако, как и у любого технологического тренда, здесь есть фундаментальный предел. Уже сейчас слои диэлектрика в транзисторах могут иметь всего несколько атомов в толщину, что неизбежно приводит к влиянию на их работу квантовых эффектов, таких как туннелирование заряда. Возможности миниатюризации полупроводниковых компонентов и увеличение рабочих частот процессоров на сегодня уже практически исчерпаны, а производительность вычислительных устройств постепенно приближается к своему пределу. Поэтому большинство крупных IT-компаний активно ищут варианты, позволяющие продолжить рост вычислительных мощностей. Производится разработка специализированных процессоров (в частности, нейроморфных) и процессорных акселераторов, рассматриваются варианты создания оптических или спинтронных компьютеров.

С другой стороны, в последние годы мы видим и ещё один глобальный тренд: чем глубже технологии проникают в нашу жизнь, тем быстрее увеличивается количество прикладных задач, избыточно сложных для существующих систем. К примеру, ресурсные требования к крупным нейросетевым моделям в последние годы становятся настолько запредельными, что разработчики вынуждены отказываться от таких задач из-за колоссального наращивания вычислительной нагрузки и соответствующих экономических издержек. Требуется совершенно радикальное увеличение производительности вычислительных устройств, которого вряд ли можно добиться привычными способами.

Известной особенностью научно-технического прогресса является неравномерность процесса развития технологий. Обычно при этом чередуются эволюционные циклы, когда техника постепенно развивается на основе уже существующих технологических решений, и революционные этапы, когда за относительно малый отрезок времени происходят бурные преобразования. Примером подобной научно-технологической революции является изобретение лазеров и полупроводниковых транзисторов, которые в свою очередь привели к массовому производству классических компьютеров. Все эти приборы основаны на коллективных квантовых эффектах, а эту эпоху принято называть первой квантовой революцией.

Если говорить о современных технологиях, основанных на квантовой теории, то они могут быть значительно усовершенствованы за счёт индивидуального контроля над состоянием отдельных квантовых объектов (атомов, фотонов и др.) и использования основополагающих принципов квантовой теории, таких как квантовая суперпозиция и запутанность. Разработка технологий такого рода составляет суть второй квантовой революции, которая осуществляется прямо сейчас на наших глазах. Технологии, основанные на контроле над одиночными квантовыми объектами, принято называть квантовыми технологиями.

Перспективными для бизнеса могут быть три направления квантовых технологий: **квантовые вычисления (квантовые компьютеры и эмуляторы их работы), квантовая защита информации (квантовые коммуникации и постквантовая криптография) и квантовые сенсоры.**

Направления развития квантовых технологий



КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

Класс вычислительных устройств, использующий для решения задач принципы квантовой механики

КВАНТОВАЯ И ПОСТКВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ

Инфраструктурные решения, обеспечивающие абсолютную защиту информации, устойчивую к классическим и квантовым кибератакам

КВАНТОВЫЕ СЕНСОРЫ

Измерительные приборы, использующие сверхчувствительные квантовые эффекты

Именно **квантовые компьютеры** являются одной из наиболее серьёзных альтернатив современной полупроводниковой электронике и способны обеспечить резкий рост вычислительной мощности при решении некоторых типов задач. Ускорение на квантовом компьютере не связано с тактовой частотой процессора, а основано на квантовом параллелизме. Один шаг квантового вычисления совершает гораздо большую работу, чем один шаг классического.

Технологии квантовой защиты информации

Квантовые коммуникации (КК) — область знаний и технологий, связанных с передачей квантовых состояний в пространстве. Одним из направлений КК является создание защищённых 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. Эта технология использует квантово-физические явления для автоматизированной выработки криптографического ключа у легитимных удалённых пользователей, например при помощи фотонов в оптоволоконных линиях или по свободному пространству. При этом злоумышленник не может незаметно «подслушать» ключ или подделать его. Стойкость ключа гарантируется фундаментальными законами физики, а шифрование осуществляется классическими алгоритмами.

Постквантовая криптография представляет собой программные решения информационной безопасности (ИБ), основанные на новых классах алгоритмов асимметричного шифрования и электронных подписей, которые позволяют защитить данные от атак с использованием как классических, так и квантовых компьютеров.

Технологии квантовых коммуникаций и постквантовой криптографии могут использоваться совместно для комплексной защиты информационных систем на всех уровнях работы с данными.

Квантовые сенсоры — высокоточные измерительные приборы, основанные на квантовых эффектах. Ожидается, что квантовые сенсоры будут иметь высокое пространственное и временное

разрешение, что позволит повысить точность измерений в сравнении с существующими классическими сенсорами, а использование свойств суперпозиции, запутанности, сжатия квантовых состояний, в свою очередь, обеспечит в перспективе максимально возможную чувствительность измерений за счёт преодоления стандартного квантового предела. Среди различных типов квантовых сенсоров и метрологических приборов: квантовые эталоны времени, магнитометры, гравиметры, гироскопы и измерители ускорения, а также измерители электромагнитного поля.

Квантовые технологии в последние годы переживают этап взрывного роста. Около 20 лет назад учёные только начали интересоваться исследованиями в этой области. Этап наиболее быстрого роста начался в 2015-2016 гг., когда к исследованиям подключились крупные игроки на технологическом рынке. С тех пор и по сегодняшний день количество опубликованных патентов в области квантовых технологий ежегодно увеличивается более чем на 30%, быстрыми темпами растёт количество и объём венчурных сделок.

В 2016-2020 гг. подавляющее большинство технологически развитых стран приняли долгосрочные программы развития квантовых технологий и приступили к строительству необходимой инфраструктуры на национальном уровне. Лидерами по государственным инвестициям являются Китай (15 млрд долл.), ЕС (7,5 млрд долл.) и США (около 5 млрд долл.). При этом в США квантовые вычисления развиваются в первую очередь с помощью частных компаний: их инвестиции, вероятно, превосходят государственное финансирование. Европа делает ставку на университеты и научно-исследовательские центры, Китай — на государственные лаборатории, Россия — на госкорпорации.

Ключевые игроки в сфере квантовых технологий

США, КАНАДА, ЯПОНИЯ индустриальные компании и крупные стартапы	ЕВРОПА университеты, исследовательские институты	КИТАЙ государственные лаборатории	РОССИЯ госкорпорации
		<p>Национальная квантовая лаборатория в Хэфэе</p>	

Признанными лидерами в разработке квантовых технологий являются США и Китай. В этих странах уже функционируют облачные платформы, через которые все желающие могут получить доступ к прототипам квантовых компьютеров, развёрнуты защищённые квантовые сети. Китай сейчас обеспечивает более половины поданных в мире патентных заявок по квантовым технологиям; США лидируют по количеству и общему цитированию научных статей.

В ряде стран (США, Нидерланды, Финляндия, Франция) началось строительство инфраструктуры для производства критических компонентов квантовых устройств. Основной задачей новых

инициатив является локализация стратегически важных производств и уменьшение зависимости от иностранных производителей. Ассигнования на строительство таких предприятий заложены в принятом в США в 2022 г. «Законе о чипах и науке» (Chips and Science Act), который призван снизить зависимость американских компаний от азиатских изготовителей полупроводников, а также в аналогичном законе (European Chips Act), утверждённом Евросоюзом в апреле 2023 г.

Создаются национальные индустриальные консорциумы с участием ведущих компаний для совместных разработок и лоббирования интересов собственных производителей. Такие объединения созданы в США и Канаде (2020 г.), в ЕС, Германии, Нидерландах, Японии (2021 г.) и в Австралии (2022 г.). В США участниками квантового индустриального консорциума QED-C стали уже 165 компаний. В России аналогичную функцию выполняет созданная в ноябре 2020 г. Национальная квантовая лаборатория (НКЛ).

По мере развития квантовых технологий многие страны вводят ограничения на их передачу «недружественным государствам». Часть квантовых технологий в 2020-2021 гг. были объявлены США и ЕС технологиями двойного назначения, в отношении них стали действовать нормы экспортного контроля. В последние годы на политический уровень перешла конкуренция между США и Китаем, лидерами квантовой гонки. Ключевые игроки китайской квантовой программы были внесены в санкционный список США. Ограничения на экспорт квантовых технологий также включены в санкционные пакеты, принятые в 2022 г. США и ЕС в отношении Российской Федерации.

В то же время в мире наблюдается глобальный дефицит квалифицированных кадров в формируемой квантовой отрасли. Критическим требованием к специалистам этого направления является наличие квалификации и знаний в широкой междисциплинарной области, включающей классическую и квантовую физику, электронную инженерию и компьютерные науки. В октябре 2020 г. Белый дом США выпустил манифест Quantum Frontiers, где среди неотложных задач, стоящих перед государством, объявил необходимость подготовки специалистов по новой, не существовавшей до настоящего времени специальности «квантовый инженер». В настоящее время образовательные программы в области квантовых технологий сформированы в ведущих вузах США, Китая, ЕС и России.

КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ И КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

В квантовом компьютере основным элементом является кубит — квантовый бит, или мера информационного содержания в квантовой теории информации. В отличие от обычного бита, он находится в состоянии квантовой суперпозиции, то есть в любой момент времени имеет одновременно сочетание значений 0 и 1. Изменение состояния каждого из кубитов в квантовом регистре влечёт за собой изменение состояний всех остальных кубитов. Это позволяет проводить вычислительные операции параллельно, в отличие от последовательных операций в классическом процессоре. Вычислительные возможности квантового компьютера определяются двумя основными характеристиками: количеством кубитов и их качеством (уровнем ошибок при совершении элементарных операций).

Технически квантовые компьютеры, как и квантовые симуляторы (специализированные системы, предназначенные для решения ограниченного класса задач), могут быть построены на основе различных физических платформ (сверхпроводники, атомы, ионы, фотоны, спины и др.), каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки. Пока квантовые вычислительные устройства, построенные с использованием различных базовых технологий, принципиально не отличаются друг от друга по производительности. Ввиду очевидной неопределённости будущих технологических прорывов в различных областях многие страны ведут параллельное развитие всех базовых технологий, среди которых в будущем, вероятно, определятся лидеры.

Современные квантовые процессоры, созданные на различных физических платформах

Сверхпроводниковые кубиты	Нейтральные атомы	Ионы в ловушках	Фотоны	Спины
 <p>Google Sycamore 73 кубита (2022)</p>	 <p>Pasqal (Франция) 200 кубит (2021)</p>	 <p>Quantinuum System H2-1 (США) 32 кубита (2023)</p>	 <p>Xanadu (Канада) 216 кубит (2022)</p>	 <p>Intel 12 кубит (2023)</p>
 <p>IBM Quantum Osprey 433 кубита (2022)</p>	 <p>QuEra (США) 64 кубита (2022)</p>	 <p>IonQ Aria (США) 32 кубита (2021)</p>	 <p>Quix (Нидерланды) 20 кубит (2021)</p>	
 <p>Rigetti Aspen-M 80 кубит (2022)</p>	 <p>ColdQuanta (США) 100 атомов (2022)</p>		 <p>Jiuzhang в Нац. лаборатория в Хэфэе (Китай) 76 кубит (2020)</p>	
 <p>Нац. лаборатория в Хэфэе (Китай) 176 кубит (2023)</p>	<p>+ Высокая когерентность, возможность работы в цифровом и аналоговом режимах - Сложность масштабирования и управления, сложность запуска цифровых алгоритмов</p>	<p>+ Высокая стабильность и точность операций - Сложность масштабирования</p>	<p>+ Работа при комнатной температуре - Сложность реализации логических цепей</p>	<p>+ Микроэлектронные технологии массового производства - Техническая сложность реализации</p>
<p>+ Технологическая зрелость, масштабируемость - Сверхнизкие температуры</p>				

На сегодняшний день наиболее производительными квантовыми системами в мире являются созданные в 2022-2023 гг. сверхпроводниковые процессоры Quantum Osprey (IBM, США) с 433 кубитами, 72-кубитный Sycamore (Google, США) и 176-кубитный Zuchongzhi (Институт науки и технологий Китая), а также ионные процессоры Forte (IonQ, США) и H2-1 (Quantinuum, США) с 32 кубитами.

Особенное внимание приковано к полупроводниковой спиновой платформе, которая, хотя и сталкивается сейчас с наибольшим количеством технических трудностей, в будущем, вероятно, обеспечит возможность массового производства дешёвых квантовых процессоров с помощью стандартных микроэлектронных технологий. Лидером в этом направлении является компания Intel, представившая в июне 2023 г. 12-кубитный квантовый процессор Tunnel Falls.

Тем не менее существующие рабочие квантовые устройства пока не превосходят классические компьютеры. Немногочисленные задачи, на которых подтверждено квантовое превосходство, в настоящее время не имеют практического применения. По оценкам специалистов, широкое практическое использование квантовых вычислений может начаться в 2024-2025 гг. с появлением 1000-кубитных систем. К этому времени квантовые компьютеры, вероятно, смогут превзойти классические в решении некоторых практических задач оптимизации и машинного обучения. Системы с миллионом и более кубитов, которые появятся после 2030 г., вероятно, будут использоваться для моделирования химических систем, при решении задач аэро- и гидродинамики, криптоанализа.

Квантовые компьютеры являются технически сложными системами, которые пока функционируют чаще всего в лабораторных условиях (при низких температурах, в условиях сверхвысокого вакуума и пр.). Индикативная стоимость конечных квантовых вычислителей всё ещё слишком высокая, а тиражи остаются ограниченными. По этой причине в ближайшем будущем значительную долю рынка квантовых вычислений составят не продажи конечных устройств, а предоставление облачного доступа к квантовым вычислительным системам. Провайдерами квантовых облачных сервисов в настоящее время являются около 20 различных компаний, среди которых IBM, Amazon и Microsoft.

Крупнейшими заказчиками квантовых компьютеров могут стать суперкомпьютерные центры. Учёные IBM разработали в этой связи концепцию «квантовоцентричных суперкомпьютеров». До появления полноценных квантовых вычислительных систем они видят промежуточной целью создание квантовых ускорителей, способных работать в связке с классическими суперкомпьютерами.

Мировой рынок квантовых вычислений находится только в стадии формирования, и его размер достаточно сложно оценить и прогнозировать. Тем не менее в последние годы пришло понимание, что уже на горизонте 2025-2030 гг., в эпоху массового внедрения квантовых компьютеров, внеквантовое технологическое лидерство станет невозможным. По этой причине на сегодняшний день многие крупные международные компании уже начали или планируют начать в скором времени различные мероприятия с целью знакомства с квантовыми вычислениями и приобретения практического опыта.

Одним из наиболее популярных направлений раннего внедрения квантовых вычислений является логистика, в том числе маршрутизация транспорта и составление расписаний. Наиболее загруженный в США морской порт г. Лос-Анджелеса использует программный комплекс на основе алгоритмов искусственного интеллекта и квантовой оптимизации, который интенсивно

используется для оптимизации загрузки морского терминала и организации взаимодействия с транспортными компаниями.

BMW начала эксперимент по оптимизации системы закупок и поставок производственных компонентов с помощью квантового компьютера. Аналогичный эксперимент в 2020 г. провела компания Toyota: было продемонстрировано определение маршрута поставок с наименьшими расходами на распространение из миллионов потенциальных вариантов закупки деталей у сотен поставщиков и их доставки через несколько транзитных складов на десятки заводов.

ExxonMobil совместно с IBM приступила к разработке квантовых алгоритмов оптимизации системы морских танкерных перевозок. Морская логистика составляет около 90% объёма всех торговых перевозок, а создание оптимальных логистических цепочек с целью сокращения общего времени в пути и с учётом приоритетов перевозок является сложнейшей вычислительной задачей.

Другой отраслью, которая уже сейчас активно внедряет квантовые вычисления, являются финансы. Подразделения, проводящие исследования квантовых вычислений, сформированы в JP Morgan Chase, Goldman Sachs, Wells Fargo (США), HSBC (Великобритания), агентстве Moody's и многих других крупных банках и финансовых организациях. Среди приоритетных задач: оценка рисков, расчёт оптимальных инвестиций, кредитного скоринга, оптимизация торговли валютными парами и многое другое.

Примеры практического внедрения квантовых алгоритмов

ФИНАНСЫ И ИНВЕСТИЦИИ	ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА	ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
 <p>ОПТИМИЗАЦИЯ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОРТФЕЛЯ</p> <p>CaixaBank/D-Wave Ускорение расчёта оптимального портфеля на 90%</p>	 <p>ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК</p> <p>Toyota/Fujitsu Выбор оптимальной цепочки среди 3 млн вариантов. Время расчёта — 30 мин.</p>	 <p>«ОСМЫСЛЕННОЕ» РАСПОЗНАВАНИЕ РЕЧИ</p> <p>Cambridge Quantum Computing Структура, управляющая языком, совпадает со структурой, управляющей квантовыми системами</p>
 <p>МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКЧЕЙН-СЕТИ</p> <p>Банк Канады / Multiverse Computing Появление устойчивых маршрутов транзакций в децентрализованных сетях</p>	 <p>ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ МОРСКОГО ПОРТА ЛОС-АНЖЕЛЕСА</p> <p>Fenix Marine Services / SavantX Удвоение эффективности перегрузочных процессов</p>	 <p>РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ</p> <p>Cambridge Quantum Computing Финансовое моделирование и анализ изображений</p>
 <p>ОЦЕНКА СПРАВЕДЛИВОЙ СТОИМОСТИ АКТИВОВ</p> <p>Multiverse Computing Уменьшение ошибки оценки на 43%</p>	 <p>ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ САМОЛЁТОВ / МОРСКИХ СУДОВ</p> <p>Toyota/Fujitsu Расчёт оптимальной загрузки Airbus A330 – 200F и Boeing 747-400 Cargo</p>	 <p>РАСПОЗНАНИЕ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ И ОБЪЕКТОВ</p> <p>Hyundai / IonQ Ускорение обучения модели с использованием квантового компьютера</p>

Кроме указанных тем, компании уже сейчас проводят пилотные эксперименты по использованию квантовых вычислений для моделирования новых лекарств и сборки геномов (Johnson & Johnson, AstraZeneca, Boehringer Ingelheim, JSR Life Sciences, Roche, и др.), оптимизации энергосетей (Минэнерго США, E.ON), разработки новых материалов (JSR Corporation, Nippon Steel и др.), аэро- и гидродинамических расчётов (Airbus, Boeing, Rolls Royce), моделирования батарей для электромобилей (Hyundai Motor Company, Daimler, Toyota Motor Corporation, а также Nissan Motor и Российский квантовый центр) и в ряде других областей.

КВАНТОВАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Квантовые коммуникации — зарождающийся рынок цифровых решений, связанных с передачей квантовой информации. Современные квантовые коммуникации подразделяются на два ключевых направления. Первое связано с построением защищённых каналов связи на основе квантового распределения ключей, которое позволяет радикальным образом повысить защищённость данных от компрометации и несанкционированного доступа. Второе направление нацелено на создание защищённых информационных систем с использованием квантовых ключей. К области квантовых коммуникаций также относят смежные (связанные) технологии, которые основаны на квантово-защищённых решениях и оптических квантовых эффектах или используют их. Это оптоэлектронная элементная база, доверенные системы передачи информации, позиционирования, навигации, управления, мониторинга и т.д.

Наиболее зрелый на сегодняшний день проект реализуется в Китае. Уже создана коммерческая квантовая оптоволоконная сеть между Пекином и Шанхаем с подключением 150 организаций — клиентов сети и скоростью передачи ключа 79 кбит/с.

КНР стала лидером в этой сфере благодаря наличию собственных серверов квантово-защищённых ключей и систем управления квантовыми сетями со стационарными и мобильными абонентами. В Китае есть заделы для производства инфраструктурного оборудования для всех типов физической связи.

В 2021 г. в Китае развёрнута полномасштабная квантовая сеть с использованием спутникового сегмента, позволяющая обмениваться квантово-защищённой информацией на расстоянии до 4600 км. Эту инфраструктуру используют более 150 организаций по всей стране, включая государственные и частные банки, муниципальные электросети и серверные центры электронного правительства.

Среди наиболее амбициозных проектов в других странах — Европейская инициатива по созданию инфраструктуры квантовых коммуникаций (EuroQCI), объединяющая 27 стран ЕС. К 2027 г. планируется сформировать единую европейскую квантовую сеть, включающую оптоволоконные линии связи и спутниковый сегмент для подключения удалённых точек.

В США построена коммерческая квантовая оптоволоконная сеть Бостон — Нью-Йорк — Вашингтон длиной 800 км. В Республике Корея при участии национального телеком-оператора SK Telecom и швейцарского вендора ID Quantique к 2025 г. появится квантовая сеть протяжённостью 2 000 км.

Оборудование магистральных оптоволоконных каналов связи в мире представлено широкой продуктовой линейкой. Швейцарская компания ID Quantique разрабатывает высокоскоростные шифраторы с поддержкой квантового канала. Научно-исследовательские проекты, нацеленные на достижение скорости шифрования от 100 Гбит/с с поддержкой КРК, реализуются в ЕС, Японии, Швейцарии. В Китае уже применяются устройства типа «точка-многоточка». Кроме того, на квантовой оптоволоконной сети Пекин — Шанхай на линиях связи длиной до 64 км используются мультиплексоры квантовых и информационных каналов (xWDM).

Японская компания Toshiba также выпускает оборудование КРК с мультиплексированием каналов при длине линий связи до 70 км и скоростью передачи ключа 40 кбит/с.

В сфере производства компонентов оборудования КРК сильные позиции у Швейцарии. Компания ID Quantique предлагает устройства квантового генератора случайных чисел (QRNG) со скоростью 240 Мбит/с, ведутся разработки устройств со скоростью более 1 Гбит/с для систем квантового распределения ключей (СКРК). Та же компания выпускает устройства счёта одиночных фотонов для квантовых коммуникаций с эффективностью 70–95% и временным разрешением от 10 до 60 наносекунд.

Наименее технологически зрелыми остаются клиентские устройства. Прототипы портативных устройств для СКРК, использующих наземные атмосферные оптические каналы, созданы в Великобритании. Для разработки систем КРК с подвижными объектами инициированы научно-исследовательские проекты в Канаде, имеющие целью создание оптического канала КРК с транспортными объектами на расстоянии до 1 км и скоростью генерации ключа 40 бит/с.

Технологии КРК нашли применение в ряде флагманских продуктов, которые позволяют создавать сервисы на основе систем квантового распределения ключей для конечных пользователей. Ключевой из них — предоставление в аренду магистральных оптоволоконных квантовых каналов связи. Сервисная модель развития рынка признана наиболее оптимальной, поскольку строительство магистральной инфраструктуры требует значительных капитальных затрат.

В отличие от спроса на инфраструктуру, мировой рынок услуг связи на инфраструктуре квантовых сетей только зарождается. Крупные игроки планируют оказывать услуги продажи квантовых ключей и квантовых VPN.

Можно выделить четыре основные услуги, которые в настоящее время могут быть предоставлены на основе СКРК:

1. **Продажа случайного ключа.** Передача ключа оператором СКРК для использования клиентом на собственных средствах криптографической защиты информации (СКЗИ). Американская компания Quantum Xchange предлагает подписку на безлимитный пакет ключей на месяц при подключении к СКРК.
2. **Квантовый VPN.** Применяется оператором ключа для оказания услуг защищённой виртуальной сети на собственных СКЗИ. Компании Verizon и British Telecom планируют увеличить устойчивость шифрования VPN благодаря решениям на основе КРК.
3. **Применение оборудования КРК для защиты участков критических линий связи.** Востребовано у операторов критической информационной инфраструктуры (КИИ). Высокоскоростные шифраторы компании ID Quantique с поддержкой КРК установлены на участках между головным офисом компании и центром обработки данных.
4. **Защита мобильной связи.** Услуга может стать крупным сегментом будущего рынка квантовых коммуникаций. Уже сегодня квантовые генераторы случайных чисел используются в телефонах Samsung.

Объём мирового рынка квантовых коммуникаций, основная доля которого приходится на оборудование и инфраструктуру, к 2035 г. составит порядка 20 млрд долл.

Существенный вклад в развитие рынка вносит активная деятельность национальных организаций по стандартизации и сертификации. Участники Китайской ассоциации коммуникационных стандартов (CCSA) разработали рекомендации по применению технологий КПК на телекоммуникационных объектах. Это упростило внедрение квантовых решений операторам связи. Ещё один успешный пример — финансовая сфера. Благодаря содействию Комиссии по регулированию банковской деятельности Китая (CBRC) к квантовой сети удалось подключить десятки ключевых офисов банков и центров обработки данных.

Европейский институт телекоммуникационных стандартов совместно с Международным союзом электросвязи планирует до 2024 г. создать систему стандартов безопасности для КПК, спутниковых сетей КПК и промежуточных узлов квантовых сетей. Параллельно ведётся работа по формированию европейской системы сертификации доверенных узлов КПК, в том числе спутниковых.

Технологии постквантовой криптографии неотъемлемо связаны с квантовыми технологиями и, в частности, с квантовыми вычислениями. Активно разрабатывая квантовые компьютеры, понимая какие вычислительные задачи они способны решать сегодня, а какие смогут решать в ближайшем будущем: мы в равной степени ждем от них как полезного вычислительного преимущества, так и пристально следим за возрастающим риском квантовой угрозы — возможности злоумышленников использовать квантовые компьютеры для реализации эффективных атак на традиционные алгоритмы шифрования.

Постквантовая криптография — это эффективный метод защиты данных государства и бизнеса от атак с применением квантовых компьютеров. Продукты на основе постквантовой криптографии возможно использовать в синергии с технологиями квантовых коммуникаций (результаты пилотных проектов в РФ по данному направлению уже есть).

Применение квантовой и постквантовой криптографии

УРОВНИ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ		КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ	ПОСТКВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ
ПЛАТФОРМЫ	Комплексные IT-системы	✓	✓
ДАТА-ЦЕНТРЫ	Критическая инфраструктура	✓	✓
ИНФРАСТРУКТУРА	Каналы коммуникации, VPN, 5G	✓	✓
ПРИЛОЖЕНИЯ	Мобайл, Веб, Интернет вещей		✓

В России у бизнес-заказчиков уже есть ряд успешных кейсов по пилотной интеграции технологий постквантовой криптографии. Например, на Уральском форуме «Кибербезопасность в финансах 2023» Банком ВТБ был протестирован первый в России экспериментальный ВКС-сервис с постквантовой защитой. Газпромбанк включил результаты пилотных проектов по постквантовой криптографии в портфель своих цифровых проектов.

США, Франция, другие страны, включают технологии на основе постквантовой криптографии в свои стратегии национальной кибербезопасности.

КВАНТОВАЯ МЕТРОЛОГИЯ И СЕНСОРЫ

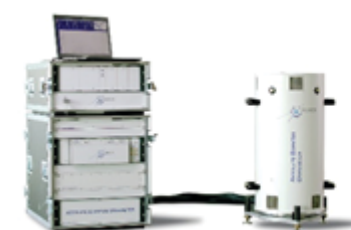
Высокая степень контроля над состоянием отдельных микроскопических систем, обеспечиваемая квантовыми технологиями, позволяет создавать квантовые сенсоры с высокой чувствительностью. Ожидается, что квантовые сенсоры будут иметь высокое пространственное и временное разрешение, что позволит повысить точность измерений в сравнении с существующими классическими сенсорами, а использование свойств суперпозиции, запутанности, сжатия квантовых состояний, в свою очередь, обеспечит в перспективе максимально возможную чувствительность. Развитие технологий разнообразных датчиков нового поколения может дать мощный импульс сразу в нескольких областях: в обороне и безопасности, навигации (космос, беспилотный транспорт); строительстве, нефтедобыче и геологоразведочных работах; в медицинской диагностике и терапии; в индустрии 4.0.

Квантовая метрология также основана на сверхточных измерениях с использованием квантовых эффектов и применяется в стандартах частоты и времени, напряжения и сопротивления.

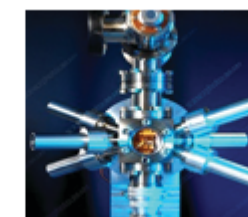
Среди различных типов квантовых сенсоров и метрологических приборов: квантовые эталоны времени, магнитометры, гравиметры, гироскопы и измерители ускорения, а также измерители электромагнитного поля.

Квантовые сенсоры сочетают малый размер и высокую точность

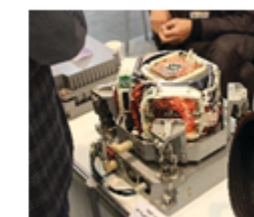
КВАНТОВЫЙ МАГНЕТОМЕТР	КВАНТОВЫЙ ХРОНОМЕТР	КВАНТОВЫЙ АКСЕЛЕРОМЕТР / ГИРОСКОП	КВАНТОВЫЙ ГРАВИМЕТР
 X 1 000 000 Уровень чувствительности, Тл/Гц	 X 1 000 Стабильность часов, Δν/ν	 X 1 000 Чувствительность, град/ч	 X 100 Чувствительность, г/Гц
10⁻¹⁵ квантовые 10⁻⁹ классические <ul style="list-style-type: none"> МЭГ, МКГ, интерфейс, мозг-компьютер Измерения геомагнитного поля для исследования земной коры, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых 	10⁻¹⁸ квантовые 10⁻¹⁵ классические <ul style="list-style-type: none"> Система спутникового позиционирования с см-разрешением (Q-GPS) Синхронизация торговых систем Измерение поверхностных сейсмических волн 	10⁻⁴ квантовые 10⁻¹ классические <ul style="list-style-type: none"> Инерционная система навигации для закрытых помещений и под водой 	10⁻¹⁰ квантовые 10⁻⁸ классические <ul style="list-style-type: none"> Определение гравитационных аномалий для поиска нефтегазовых месторождений, карстовых пещер и пр.



Квантовый гравиметр



Квантовые часы



Квантовое инерционное устройство (акселерометр и гироскоп)

Две основные области коммерческого применения на сегодняшний день — навигационные системы (атомные часы для системы глобального позиционирования GPS) и медицина (магнитные сенсоры для МЭГ и МКГ). Со временем на рынке прогнозируется дальнейший рост в сегменте квантовых магнитометров, квантовых систем визуализации и новых типов сенсоров, таких как квантовые акселерометры и гироскопы. Рынок, вероятно, останется сильно фрагментированным, а новыми потребителями квантовых сенсоров станут оборонная отрасль (системы навигации и визуализации), автомобильный транспорт (новые системы навигации) и телекоммуникационные операторы и производители систем квантовой криптографии (детекторы фотонов для систем защищённой связи).

В области разработки новых устройств основные усилия в ближайшее десятилетие будут сосредоточены на повышении надёжности систем и создании интегрированных схем малого форм-фактора, которые обеспечат возможности широкого внедрения квантовых сенсоров на массовые рынки.

ДРАЙВЕРЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РФ

Квантовые технологии в значительной мере основываются на достижениях фундаментальной науки в тех направлениях, в которых российские учёные традиционно сильны. Советско-российская школа квантовой физики является одной из лучших в мире. На счету российских учёных Нобелевские премии по физике за вклад в разработку теории конденсированных сред (Ландау, 1962 г.) открытие лазеров (Басов, Прохоров, 1964 г.), открытие сверхтекучести (Капица, 1978 г.), разработка полупроводниковых структур (Алфёров, 2000 г.), теории сверхпроводимости (Гинзбург, 2003 г.) и графена (Гейм, Новосёлов, 2010 г.). Научная школа значительно пострадала из-за массового отъезда учёных за границу в 1990-х и 2000-х годах, что, однако, сформировало в области квантовой физики сильнейшую русскоговорящую международную научную диаспору. При этом в России остались десятки научных групп, способных проводить исследования мирового уровня. Появившаяся в последнее десятилетие тенденция к возвращению состоявшихся за границей российских учёных и привлечению их зарубежных коллег без российского опыта позволит обеспечить России потенциал для прорыва и захвата лидирующих позиций в отдельных направлениях квантовых технологий.

Квантовые компьютеры




Поддержка развития квантовых вычислений в России осуществляется в рамках федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». В целях объединения и координации усилий, направленных на ускорение технологического развития и достижение Россией лидирующих позиций на глобальных технологических рынках в высокотехнологичной области «Квантовые вычисления», с 10.07.2019 реализуется соглашение о намерениях между Правительством Российской Федерации и госкорпорацией «Росатом».

Основной механизм его реализации — дорожная карта развития высокотехнологичной области «Квантовые вычисления», утверждённая в июле 2020 г. На реализацию программы предусмотрено финансирование в размере 25,8 млрд рублей в течение пяти лет до 2024 г. включительно. Реализация дорожной карты осуществляется в плановом порядке. К работе над проектом госкорпорация «Росатом» консолидировала единый научный коллектив, в который вошли более 300 учёных из порядка 15 российских ведущих научно-исследовательских центров и высших учебных заведений.


Основные мероприятия в рамках дорожной карты квантовых вычислений



Полный стек квантовых вычислений:

-  Языки программирования и среды разработки
-  Библиотеки квантовых алгоритмов
-  Квантовые алгоритмы

- ☑ Логический квантовый процессор
- ☑ Алгоритм подавления/исправления ошибок
- ☑ Управление физической системой ☑ Измерение состояния физической системы
- ☑ Физический квантовый процессор
- ☑ Software ☑ Hardware

 12 направлений развития

5 направлений	
SOFTWARE	☑ Облачная платформа для квантовых вычислений
	☑ Квантовые алгоритмы
	☑ Квантовые коды коррекции ошибок
	☑ Квантовые методы подавления ошибок
	☑ Эмулятор квантовых вычислений
7 направлений	
HARDWARE	☑ Сверхпроводниковые квантовые компьютеры и симуляторы
	☑ Квантовые компьютеры и симуляторы на нейтральных атомах
	☑ Квантовые компьютеры и симуляторы на основе ионов в ловушках
	☑ Квантовые компьютеры и симуляторы на основе фотонов и интегральной оптики
	☑ Симуляторы на основе поляритонных конденсатов
	☑ Магنونные кубиты
	☑ Квантовые вычисления на примесных атомах и квантовых точках в кремнии
! Приоритетное направление (9 направлений)	

В России практические разработки начались позже, чем в других странах, что обуславливает определённое технологическое отставание от стран-лидеров, которое будет сокращаться уже в ближайшие годы. Текущее технологическое отставание РФ в области квантовых вычислений от мировых лидеров оценивается в 6–9 лет, но динамика роста рынка остаётся неопределённой. По ряду направлений достигнуты первые результаты мирового уровня: в декабре 2021 г. экспериментально продемонстрирован новый подход к масштабированию квантовых вычислителей с использованием новой технологии, кудитов, обеспечив входение России в тройку стран (вместе с США и Австрией) с аналогичными достижениями рассматриваемого периода.

Наиболее совершенными прототипами квантовых процессоров, созданными в рамках реализации дорожной карты «Квантовые вычисления», являются:

- 16-кубитный процессор на ионах в ловушках на базе кудитов (ФИАН);
- демонстрационная схема 8-кубитного квантового симулятора на сверхпроводниках (МФТИ);
- экспериментальный образец 4-кубитного квантового компьютера на основе фотонных чипов (МГУ им. М.В. Ломоносова);
- экспериментальный образец 16-кубитного квантового компьютера на нейтральных атомах (МГУ им. М.В. Ломоносова).

Достижения в рамках реализации дорожной карты «Квантовые вычисления»

СОЗДАНЫ ПЕРВЫЕ В РФ КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ	ДОСТУПНЫ УЖЕ СЕГОДНЯ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ В РФ	
 Универсальные квантовые компьютеры  8-кубитный квантовый компьютер на сверхпроводниках (ноябрь 2022 г.) 16-кубитный ионный квантовый компьютер (декабрь 2022 г.)	 ↔  Квантово-вдохновлённые алгоритмы и эмуляторы Программные эмуляторы используют CPU/GPU кластера	Облачный доступ к квантовым вычислениям 

К концу 2024 г., согласно плану работ, будут изготовлены прототипы квантовых процессоров на различных физических платформах с количеством кубитов в несколько десятков, а также организована облачная платформа для доступа к ним. К 2030 г. планируется перейти к практическому применению квантовых компьютеров для решения прикладных задач, начать коммерциализацию и выйти на мировой рынок.

Одной из приоритетных задач в интересах развития квантовых технологий одновременно с продолжением научных исследований является локализация производства высокотехнологичного оборудования и налаживание изготовления российской электронно-компонентной базы, компонентов, материалов. При этом спектр созданных российских технологий в области микроэлектроники и фотоники будет востребован на рынке не только для квантовых компьютеров. Среди необходимого оборудования, создание которого планируется в рамках импортозамещения: сверхбыстродействующие электронные компоненты, технологическое оборудование для полупроводникового производства, элементы гибридной фотоники, криогенное и лазерное оборудование.

В рамках выполнения дорожной карты «Квантовые вычисления» в ноябре 2020 г. в России основана Национальная квантовая лаборатория. Это научно-технологический консорциум, в который вошли ключевые участники российского квантового сообщества. НКЛ консолидирует усилия университетов, научных центров, команд-разработчиков, стартапов, технологических компаний, финансовых организаций и является основой отечественной квантовой экосистемы. По своей сути НКЛ является аналогом научно-индустриальных объединений, созданных в других странах. В настоящее время в состав НКЛ входят 11 российских организаций. В перспективе НКЛ будет включать нанотехнологический производственный центр (nanofabrication) и лабораторный комплекс и будет заниматься созданием первой полномасштабной, стопроцентно российской квантовой платформы, включающей аппаратное обеспечение, систему моделирования, универсальную среду программирования и открытую облачную платформу.

Сотрудничество с целью развития квантовых технологий



Зарождение новой квантовой индустрии не может не повлиять на необходимость интегративных изменений в процессах, протекающих в различных компаниях. Хотя появление мощных квантовых компьютеров с достаточно большим количеством кубитов и низким уровнем ошибок ожидается лишь на горизонте ближайших 10-15 лет, уже сейчас для российских исследователей является возможным проведение пилотных вычислений с использованием разработанных в стране программных эмуляторов, а также существующих в мире облачных платформ с открытым и платным доступом. В разрезе промышленных применений квантовые вычисления будут нужны компаниям, которым необходимо обрабатывать много данных или решать сложные расчётные задачи (например, в области финансов и инвестиций, энергетики, транспорта, логистики, химии и фармацевтики). Сейчас пилотные проекты в области квантовых вычислений инициированы в ПАО «Сбербанк», АО «Газпромбанк», ПАО «Роснефть» и АО «Газпромнефть». Предполагается, что подобного рода проекты будут запускаться в различных российских компаниях.

В России в настоящее время в ряде вузов уже реализуются профильные образовательные программы по квантовым технологиям. Также ряд образовательных организаций реализуют программы дополнительного образования, направленные на повышение компетенций в области квантовой физики широкого круга потребителей.

Квантовые коммуникации

Ключевая инициатива в области квантовых коммуникаций в нашей стране — действующее с 2019 г. соглашение о намерениях между Правительством Российской Федерации и ОАО «РЖД». Для его реализации была утверждена дорожная карта развития высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации», которая позволяет координировать деятельность участников по разработке востребованных передовых решений. Перечень приоритетных технологий дорожной карты достаточен для создания флагманских продуктов и продуктовых линеек на горизонте планирования до 2024 г.

В конце 2022 г. дорожная карта была актуализирована. В частности, уточнена продуктовая линейка в привязке к уровню готовности ключевых технологий. Новая редакция предусматривает

задачи развития до 2030 г. с упором на создание и внедрение прикладных продуктов и сервисов с использованием квантовых коммуникаций. Решения на основе квантовых сетей связи будут распространяться всё шире и постепенно станут стандартом в сферах деятельности, где требуется максимальная защита данных.

В России сформирован значительный научно-технологический задел в области квантовых коммуникаций для производства оборудования и создания сервисов. Задача ОАО «РЖД» как компании, лидирующей в этом направлении, — трансформировать накопленные наработки в крупные инфраструктурные проекты, обеспечить дальнейшую разработку решений, содействовать развитию экосистемы и рынка квантовых коммуникаций.

Экосистема развития квантовых коммуникаций образована партнёрством научных организаций, ведущих университетов, стартапов, производителей оборудования и потребителей соответствующих услуг и сервисов. На текущий момент экосистема квантовых коммуникаций объединяет более 100 организаций, включая государственные корпорации, крупные нефтегазовые и банковские организации, технопарки и аналитические центры. По мере повышения зрелости технологий конфигурация экосистемы меняется. Новыми участниками становятся организации, которые выводят готовые продукты на рынок: системные интеграторы, операторы связи, разработчики сервисов.

Функциональные блоки экосистемы квантовых коммуникаций в России



Источник: ОАО «РЖД»

Экосистемный подход позволяет выстраивать кооперационные цепочки, обмениваться опытом в рамках регулярно проводимых ОАО «РЖД» стратегических сессий и формировать консолидированную позицию по ключевым аспектам деятельности в области квантовых коммуникаций, в том числе по вопросам национальной и международной стандартизации.

Улучшение методов обеспечения информационной безопасности — запрос бизнеса, возрастающий на фоне устойчивого расширения масштабов киберугроз, усложнения их инструментария и непредсказуемости последствий. В России интерес к этой тематике многократно усилился в условиях сложной геополитической обстановки: в 2022 г., по данным «Лаборатории Касперского», число кибератак на бизнес выросло по сравнению с предыдущим

годом в четыре раза. Также повышается актуальность новых технологий передачи ключей, то есть доставки метода шифрования данных до распределённых объектов.

На сегодняшний день квантовые коммуникационные сети на основе оптоволоконных каналов связи — технологически зрелые решения, готовые к практическому использованию после соответствующей сертификации. В области атмосферной связи осуществляется коммерциализация ряда имеющихся разработок. В частности, к 2025 г. запланирован ввод в эксплуатацию такого рода решений на базе инфраструктуры ОАО «РЖД». Также ОАО «РЖД» совместно с госкорпорацией «Роскосмос» проводит исследования технологий космической квантовой связи. Результаты этих работ будут использованы для дальнейших космических экспериментов и развития соответствующих сервисов.

В области инфраструктуры квантовых коммуникаций уже сформирован спрос со стороны государства и бизнеса на компоненты и оборудование КРК. Более 90% организаций на рынке обеспечивают полную цепочку создания стоимости, включая производство компонентов, оборудования и программного обеспечения.

ОАО «РЖД» реализует инициативу по созданию стандартов квантовых сетей и сертификации оборудования, которые позволят унифицировать процедуру внедрения и правила эксплуатации подобных систем. Для сохранения текущих темпов развития необходимы пилотные проекты и сценарии использования квантовых сетей и коммерциализации услуг на их основе (например, квантового VPN), разработка доступных по стоимости абонентских систем и сертификация создаваемых решений.

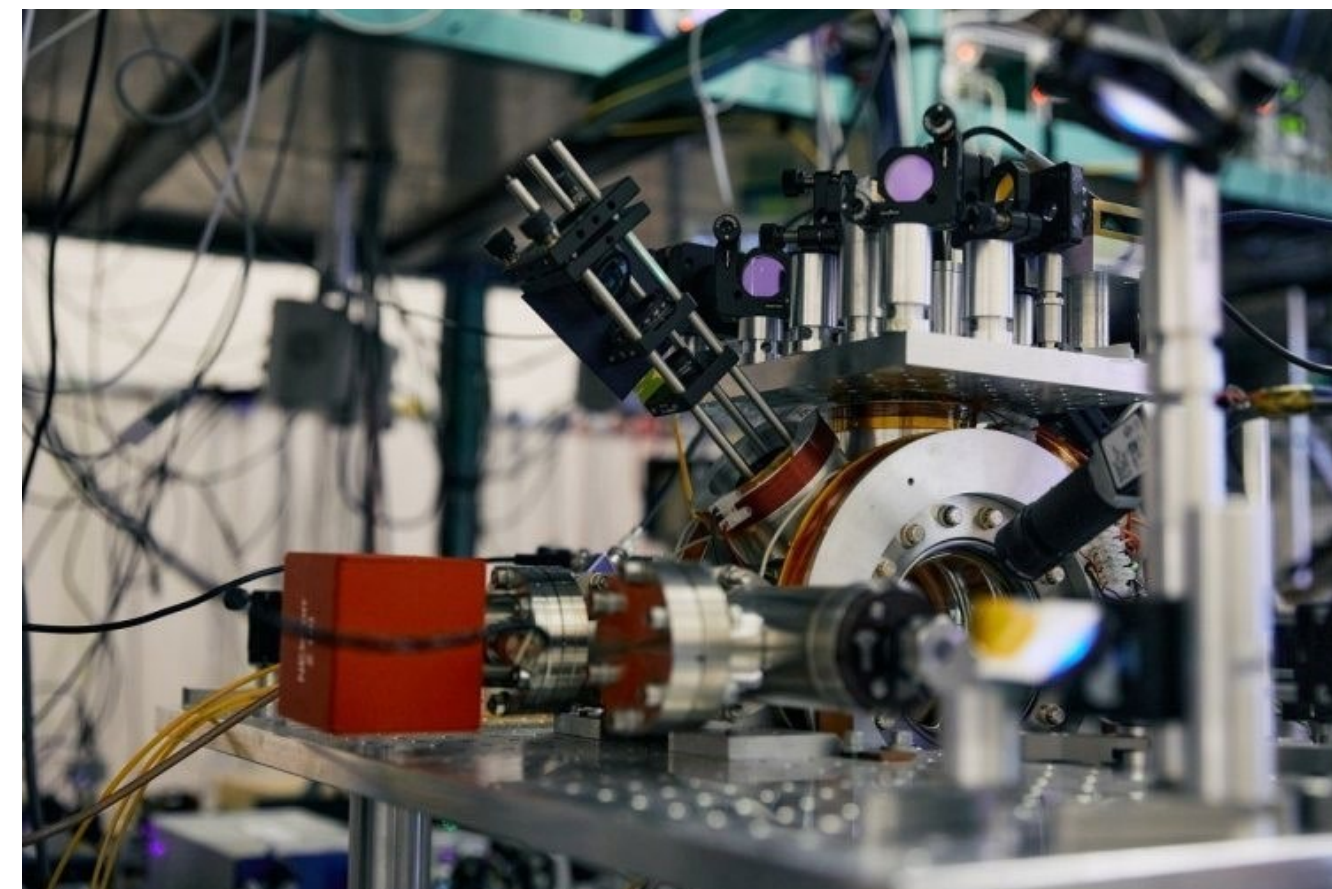
Квантовые сенсоры

Квантовые технологии обеспечивают предельно возможную чувствительность измерительных устройств, в том числе для геологоразведки, медицины, навигации, телекоммуникаций, Интернета вещей и др., поэтому создание квантовых сенсоров является стратегически важной задачей, обеспечивающей Российской Федерации технологическую независимость. Поскольку сфера применения квантовых сенсоров широка, очевидны перспективы их внедрения на гражданских и на оборонных рынках как внутри Российской Федерации, так и за её пределами.

В ряде российских исследовательских институтов идут работы над решениями в области квантовой сенсорики и метрологии. К числу таких решений, имеющих практические приложения и коммерческие перспективы, можно отнести оптические атомные часы, гравиметры и акселерометры на атомах рубидия, гироскопы на ансамблях спинов в твёрдом теле, локальные сенсоры магнитного поля и температуры на основе азотнозамещённой вакансии в алмазе и электрического поля на центрах окраски, датчики электромагнитных полей на основе когерентных состояний спинов в магнитоупорядоченных средах, магнитоплазменные сенсоры, твердотельные фотоумножители, спектрограф (электронный нос) с использованием микрорезонаторов, источники и приёмники одиночных фотонов. Важной поддерживающей технологией является разработка дешёвых лазерных модулей.

В настоящее время ведётся разработка дорожной карты по квантовым сенсорам с активным участием ГК «Ростех» и ГК «Росатом».

Оптические атомные часы, разработанные в ФИАН



КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГОРОДСКАЯ СРЕДА

Около 21% населения России проживает в 14 городах-миллионниках и городах федерального значения. В Москве и Санкт-Петербурге проживает каждый девятый житель страны. По мере роста городского населения всё более актуальным становится процесс активного поиска новых подходов и методов решения обостряющихся инфраструктурных проблем. В фокусе концепции «умного города» находится интеграция информационных и коммуникационных технологий и Интернета вещей для управления городским имуществом, включая местные информационные системы, больницы, школы, библиотеки, транспорт, электростанции, системы водоснабжения и управления отходами, правоохранительные органы и другие общественные службы. «Умные города» основаны на передовых научных разработках, которые включают компьютерные технологии, алгоритмы, связь, теорию информации и искусственный интеллект. Именно потенциальная способность квантовых систем решать вычислительно сложные задачи оптимизации и машинного обучения, а также обеспечивать безопасную связь между городскими системами и инфраструктурными объектами обуславливает интерес к ним в рамках концепции городов будущего.

Москва по праву считается передовым в России центром апробации перспективных технологий. Коммерческие и государственные компании успешно реализуют в столице множество научно-технологических проектов, в том числе с использованием передовых российских разработок. Квантовые технологии могут применяться в наиболее приоритетных отраслях экономики города.

№	ОТРАСЛИ ЭКОНОМИКИ	КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ			
		КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ	КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ	ПОСТКВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ	КВАНТОВЫЕ СЕНСОРЫ
1	Фармацевтическая промышленность	✓			
2	Медицинская промышленность	✓		✓	✓
3	Авиа- и ракетостроение	✓	✓	✓	
4	Информационные технологии	✓	✓	✓	
5	Биохимия	✓		✓	
6	Автомобильная промышленность	✓	✓	✓	✓
7	Микроэлектроника	✓	✓	✓	✓
8	Московская электронная школа	✓	✓	✓	
9	Энергетика	✓	✓		
10	Обработка видеопотока и GPT	✓			✓

Высоко оценивая важность квантовых технологий, Правительство Москвы рассматривает следующие направления пилотирования.

По направлению квантовых вычислений:

№	ОТРАСЛИ ЭКОНОМИКИ ГОРОДА	ПРИМЕРЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ
1	Фармацевтическая промышленность	Задачи ускорения разработки новых лекарственных препаратов и др.
2	Медицина	<ul style="list-style-type: none"> Повышение точности распознаваемых изображений. Разработка методов детектирования аномалий в медицинских данных. Составление расписаний смен медицинских работников.
3	Авиа- и ракетостроение	<p>Основные категории задач:</p> <ul style="list-style-type: none"> логистика и маршрутизация; составление расписаний; финансовая оптимизация; проектирование механизмов и оборудования; симуляция комплексных физических процессов; моделирование новых материалов и другие направления. <p>Пример конкретной задачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> решение задачи ламинарно-турбулентного перехода.
4	Информационные технологии	<p>Основные категории задач:</p> <ul style="list-style-type: none"> кластеризация и выявление зависимостей в данных; обработка и распознавание изображений; системы обработки естественного языка; построение предсказательных моделей и другие направления. <p>Примеры конкретных задач:</p> <ul style="list-style-type: none"> ускорение обучения моделей искусственного интеллекта в области анализа изображений для обнаружения движущихся объектов на железнодорожных путях; ускорение обучения моделей искусственного интеллекта в области анализа текста для анализа документов; повышение качества распознавания дорожных знаков в системах управления беспилотными средствами; оптимизация прогнозирования транспортного потока и маршрутизации городского транспорта на основе данных видеонаблюдения; видеоаналитика объектов городской инфраструктуры. <p>Основные категории задач по направлению интернет-рекламы:</p> <ul style="list-style-type: none"> оптимизация планирования рекламных выходов; максимизация отдачи от рекламных кампаний; построение предсказательных моделей и другие направления.

5	Биохимия	<p>Задачи квантовой химии:</p> <ul style="list-style-type: none"> · ускорение процесса изучения биохимических реакций; · более точная характеристика биологических систем на молекулярном уровне. <p>Примеры конкретных задач:</p> <ul style="list-style-type: none"> · предсказание белковых структур и взаимодействия белков с малыми молекулами; · ускорение сборки геномов и другие задачи.
6	Автомобильная промышленность	<p>Основные категории задач:</p> <ul style="list-style-type: none"> · оптимизация производства; · складская логистика и оптимизация цепей поставок; · оптимизация транспортного потока, задачи доставки последней мили и другие задачи.
7	Микроэлектроника	<p>Основные категории задач:</p> <ul style="list-style-type: none"> · оптимизация производства; · складская логистика. <p>Разработка и апробация новых программно-аппаратных решений, включая аппаратно-ускоренные эмуляторы квантовых вычислений.</p>
8	МЭШ (Московская электронная школа)	<ul style="list-style-type: none"> · Образовательные программы с использованием отечественных программных эмуляторов квантовых вычислений. · Составление расписаний занятий/экзаменов. · Распределение классных коллективов по преподавателям.
9	Энергетика	<ul style="list-style-type: none"> · Управление в реальном времени сетями со сложным режимом генерации и потребления. · Анализ переходных процессов. · Прогнозная аналитика потребления энергии. · Планирование новых архитектур городских энергосистем для повышения их устойчивости и надёжности.
10	Обработка видеопотока и СРТ	<p>Повышение качества распознавания дорожных знаков в системах управления беспилотными средствами.</p> <p>Повышена точность и скорость систем аутентификации и идентификации пользователей городской инфраструктуры за счёт оптимизации моделей машинного обучения и обучения нейросетей.</p> <p>Разработаны специализированные алгоритмы для детектирования:</p> <ul style="list-style-type: none"> · качества освещения дорог; · появления дыма/огня; · оставленных предметов и др.

		<p>Применение квантовых нейронных сетей потенциально может увеличить точность распознавания текста при одновременном ускорении времени обработки данных.</p> <p>Разработаны системы обработки естественного языка на основе квантовых нейронных сетей, способные понимать смысловое содержание речи.</p>
--	--	--

По направлению квантовых коммуникаций:

№	ОТРАСЛИ ЭКОНОМИКИ ГОРОДА	ПРИМЕРЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ
1	Медицина	Применение аппаратно-программных решений системы квантового распределения ключей для обеспечения защиты сетевой инфраструктуры, в том числе с использованием действующего аппаратно-программного комплекса шифрования, а также персональных данных сотрудников системы здравоохранения и пациентов.
2	Авиа- и ракетостроение	Применение аппаратно-программных комплексов квантового распределения криптографических ключей.
3	Информационные технологии	
4	Автомобильная промышленность	
5	Микроэлектроника	Апробация применения отечественных процессоров в составе комплекса решений квантового распределения криптографических ключей.
6	МЭШ (Московская электронная школа)	<p>Внедрение отечественных образовательных аппаратно-программных комплексов квантовых коммуникаций, методологий и лабораторных работ по квантовым коммуникациям в образовательный процесс (уроки физики, дополнительные занятия, «Кванториумы»).</p> <p>Развитие направления «квантовые классы» в учебных заведениях г. Москвы.</p> <p>Применение аппаратно-программных решений системы квантового распределения ключей для обеспечения защиты сетевой инфраструктуры, в том числе с использованием действующего аппаратно-программного комплекса шифрования, а также персональных данных пользователей МЭШ.</p>

По направлению постквантовой криптографии:

№	ОТРАСЛИ ЭКОНОМИКИ ГОРОДА	ПРИМЕРЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ
1	Медицинская промышленность	Применение программных решений ИБ на основе постквантовых алгоритмов для квантово-устойчивой защиты медицинских данных.
2	Авиа- и ракетостроение	Квантово-устойчивая защита инженерной тайны.
3	Информационные технологии	Разработка и апробация в ограниченных информационных контурах цифровых продуктов для защиты данных государства, бизнеса и конечных пользователей от квантовой угрозы по следующим направлениям: <ul style="list-style-type: none"> • квантово-устойчивое сетевое оборудование; • квантово-устойчивые операционные системы; • квантово-устойчивые мобильные платформы; • квантово-устойчивые приложения; • квантово-устойчивые блокчейн-платформы.
4	Биохимия	Применение программных решений ИБ на основе постквантовых алгоритмов для квантово-устойчивой защиты генетических данных.
5	Автомобильная промышленность	<ul style="list-style-type: none"> • Реализация квантово-устойчивой защиты каналов V2X. • Контроль целостности передаваемого встроенного программного обеспечения транспортных средств, включая беспилотный транспорт.
6	Микроэлектроника	Аппаратное ускорение постквантовых алгоритмов шифрования на отечественных процессорах и микроконтроллерах, включая решения для промышленного и бытового Интернета вещей: <ul style="list-style-type: none"> • инструкции для аппаратного ускорения постквантовой криптографии в текущих версиях процессоров; • криптографические сопроцессоры с поддержкой постквантовой криптографии; • квантово-устойчивые смарт-карты и криптографические токены.
7	МЭШ (Московская электронная школа)	<p>Интеграция лекционных материалов и интерактивных лабораторных работ по постквантовой криптографии в образовательный процесс.</p> <p>Применение программных решений ИБ на основе постквантовой криптографии для квантово-устойчивой защиты личных данных учеников и сотрудников школ.</p> <p>Применение программных решений ИБ на основе постквантовой криптографии для квантово-устойчивой защиты ВКС-сервисов для проведения онлайн-занятий.</p>

По направлению квантовых сенсоров:

№	ОТРАСЛИ ЭКОНОМИКИ ГОРОДА	ПРИМЕРЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ
1	Медицинская промышленность	<ul style="list-style-type: none"> • Ранняя диагностика заболеваний. • Терапия сложных заболеваний. • Адресная доставка лекарств.
2	Автомобильная промышленность	Повышение точности навигационных устройств (например, применение в лидарах).
3	Обработка видеопотока и GPT	Пилотная интеграция квантовых сенсоров с отечественными микроэлектронными компонентами с целью дальнейшего построения конечных продуктов.
4	Микроэлектроника	

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Как было показано выше, квантовые технологии начинают активно переходить из состояния перспективных фундаментальных и научных разработок в категорию практически используемых факторов экономического развития. С точки зрения макроэкономического эффекта квантовые технологии обладают значительным потенциалом, использование которого становится важной задачей развития народного хозяйства.

Анализ основных отраслей экономики показывает, что перспективное влияние квантовых технологий более высокое в традиционно наукоёмких отраслях.

С учётом реальных объёмов производства в различных отраслях и их долях в экономике России можно выделить ключевые отрасли с точки зрения общего макроэкономического эффекта. Так, наибольший экономический эффект внедрение квантовых технологий принесёт в обрабатывающих производствах, торговле, логистике, добыче полезных ископаемых, в операциях с недвижимостью и строительстве.

УРОВЕНЬ ПРЯМОГО
ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

ОТРАСЛИ

Значительный	<ul style="list-style-type: none"> Химическая и фармацевтическая промышленность Обеспечение электрической энергией Геология и разведка недр, геодезическая и гидрометеорологическая службы Деятельность в области информации и связи Деятельность финансовая и страховая
Средний	<ul style="list-style-type: none"> Государственное управление и обеспечение военной безопасности Деятельность профессиональная, научная и техническая Транспортировка и хранение Электронная промышленность Автомобильная промышленность и авиация Деятельность в области здравоохранения
Низкий	<ul style="list-style-type: none"> Деятельность административная и сопутствующие дополнительные услуги Рекламная деятельность и исследование конъюнктуры рынка Образование Строительство Обрабатывающие производства Организация сбора и утилизация отходов, деятельность по ликвидации загрязнений Торговля оптовая и розничная Сельское и лесное хозяйство Предоставление прочих видов услуг

При этом следует заметить, что косвенный и мультипликативный эффект развития отдельных отраслей на основе внедрения квантовых технологий во всю экономическую систему может существенно превышать прямой эффект для самих отраслей. Особенно это актуально для отраслей социального сектора экономики, таких как образование и здравоохранение.

В целом расчёты показывают, что при активном внедрении каждая квантовая технология способна оказать экономический эффект в объёме 2–2,5% ВВП.



Информационно-
аналитическая система
ROSCONGRESS.ORG